

Propuesta metodológica para la estimación de modelos de carga de vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía

Juan Fernando Gil Aguirre

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Pereira, Risaralda

Marzo de 2019



**Propuesta metodológica para la estimación de modelos de carga de
vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía**

Juan Fernando Gil Aguirre

Tesis presentada como requisito preliminar para aspirar al título de

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D. Sandra Milena Pérez Londoño

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Pereira, Risaralda

Marzo de 2019

Agradecimientos

A Dios, por todas sus bendiciones

A mis padres, por el esfuerzo, amor y dedicación brindados en todo el tiempo de este proyecto.

A la ingeniera Sandra Milena Pérez, por la confianza, valioso tiempo y la paciencia que dedicó a lo largo de este camino, y por el conocimiento compartido en el proceso.

Al ingeniero Juan José Mora Flórez, por el acompañamiento y los sabios consejos compartidos en todo este tiempo de formación.

A mis compañeros y amigos de la Maestría en Ingeniería Eléctrica: Luis Miguel, Manuel, Valentina, Ana, Darwin, Julián, Walter, con los cuales compartí grandes momentos.

A los profesores del programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica por todo el conocimiento transmitido.

A todos, infinitas gracias.

Resumen

La presente tesis de maestría aborda la problemática del modelado de carga basado en mediciones, cuando se consideran nuevos elementos de carga, tales como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía, en sistemas de potencia modernos.

De acuerdo a lo anterior, se plantea una metodología sistemática que permite definir los modelos que logran ajustarse al comportamiento de las cargas antes mencionadas, mediante la aplicación conjunta de técnicas meta heurísticas de optimización y la definición de indicadores del error, que forman parte de un proceso iterativo.

Índice general

1. Introducción.....	7
1.1 Planteamiento del problema.....	7
1.2 Objetivos de la tesis.....	8
1.2.1 Objetivo general.....	8
1.2.2 Objetivo específicos.....	8
1.3 Justificación.....	8
1.4 Aportes del proyecto.....	9
1.5 Estructura del documento.....	9
2. Aspectos teóricos.....	11
2.1 Conceptos sobre modelado de carga.....	11
2.1.1 Modelos estáticos.....	12
2.1.2 Modelos dinámicos.....	13
2.2 Estrategias de modelado de carga.....	15
2.2.1 Estrategia de modelado basada en componentes.....	15
2.2.2 Estrategia de modelado basada en mediciones.....	15
2.3 Cargas en sistemas de potencia modernos.....	18
2.3.1 Sistema de almacenamiento por superconducción <i>SMES</i>	18
2.3.2 Modelos propuestos para el <i>SMES</i>	20
2.3.3 El vehículo eléctrico.....	22
2.3.4 Modelos propuestos para el vehículo eléctrico.....	24
2.3.5 Característica de carga de vehículos tipo Tesla.....	26
2.3.6 Estación de carga rápida para vehículos eléctricos.....	27
2.4 Estado del arte.....	28
3. Modelado del convertidor en fuente de tensión.....	31
3.1 El convertidor en fuente de tensión VSC.....	31
3.2 Clasificación y modelado de los sistemas basados en VSC.....	32
3.3 Estructura de control del sistema VSC con frecuencia impuesta por la red.....	33
3.3.1 Lazo de seguimiento de fase (PLL, <i>Phase Locked Loop</i>).....	36
3.3.2 Control interno de corrientes.....	37
3.4 Implementación estación de carga rápida para vehículos eléctricos basada en VSC	39
3.5 Implementación sistema <i>SMES</i> basado en VSC.....	41
4. Metodología para la estimación y selección de modelos de carga.....	47
4.1 Estrategia general aplicada a estimación de carga de vehículos eléctricos.....	47
4.1.1 Etapa 1: Selección de los modelos y perfiles de carga.....	49
4.1.2 Etapa 2: Estimación de parámetros de los modelos de carga de la estación.....	53
4.1.3 Etapa 3: Evaluación de los modelos.....	59
4.2 Estrategia general aplicada al <i>SMES</i>	61
4.2.1 Etapa 1: Definición del modelo para el <i>SMES</i> y selección de registros operativos..	61
4.2.2 Etapa 2: Estimación de parámetros del modelo para el <i>SMES</i>	62
4.2.3 Etapa 3: Evaluación del modelo.....	63
5. Resultados obtenidos.....	65
5.1 Sistemas de prueba y aplicación.....	65

5.1.1 Caracterización de estación de carga rápida para vehículos eléctricos.....	65
A. Definición de los parámetros iniciales.....	67
B. Selección de los parámetros más adecuados.....	69
C. Evaluación del modelo.....	71
5.1.2 Caracterización SMES conectado a sistema máquina síncrona-barraje infinito.....	73
A. Etapa de estimación.....	75
B. Etapa de validación.....	76
6. Conclusiones.....	79
6.1 Conclusiones finales y recomendaciones.....	79
6.2 Trabajos futuros.....	80
7. Bibliografía.....	81

1

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Disponer de modelos adecuados de carga es esencial para conseguir que los resultados obtenidos al realizar diversos análisis en los sistemas eléctricos, sean confiables y ajustados a las condiciones operativas de los mismos. Tal es el caso del análisis de estabilidad y control de los sistemas de potencia, en los cuales existe una gran dependencia de los resultados que se obtienen, con el modelo de carga empleado. Actualmente, el área de modelado de carga presenta un especial interés en el estudio de los sistemas eléctricos, debido a la creciente disponibilidad de mediciones que existen en las redes modernas y a la alta penetración de nuevos tipos de carga en la red, entre los que se destacan los vehículos eléctricos (*Electric Vehicle* - EV) [1], los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción (*Superconducting Magnetic Energy Storage* - SMES) y los súper capacitores (*Super Capacitor* - SC) [2]. A pesar de dicho interés, el modelado de carga sigue presentando grandes desafíos para los analistas de redes, debido a que tanto la composición de las cargas, así como los niveles de demanda de las mismas, presenta alta variabilidad con el tiempo.

En la actualidad, se encuentran diferentes posiciones y propuestas en la literatura especializada, sobre las estructuras de modelos más indicadas, para representar satisfactoriamente los comportamientos de las cargas, en los sistemas a los cuales se encuentran interconectadas. Para el caso específico del vehículo eléctrico, se encuentran por lo menos tres enfoques para su modelado: los que están basados en estructuras clásicas de carga, los modelos de carga derivados y los basados en la incertidumbre de las variables. En el primer enfoque se plantean aproximaciones del vehículo eléctrico a los modelos clásicos de tensión, corriente o potencia constante [3][4], pero autores en [5][6] proponen que durante el tiempo de carga de las baterías de los vehículos eléctricos, existen características que no alcanzan a ser considerados por los modelos de carga clásicos como el ZIP (impedancia, corriente y potencia constante), en cambio serían más pertinentes modelos que relacionen la potencia con otros factores como el estado de carga, la tensión en terminales de las baterías, y las corrientes demandadas por los convertidores de los cargadores de baterías, entre otras.

Por otra parte, los modelos de carga derivados [1][5], consideran los efectos de las baterías y el control sobre los convertidores. Finalmente, los modelos que tienen en cuenta la incertidumbre de tipo aleatoria [7][8]; consideran aspectos como los hábitos de los conductores, así como la

distribución de probabilidad del estado de carga de las baterías de los vehículos, al iniciar el proceso de recarga.

Similarmente, para el caso de los sistemas de almacenamiento autores como [9] proponen emplear circuitos equivalentes con parámetros concentrados R, L y C, para modelar diferentes tipos de sistemas de almacenamiento. Esto permite analizar elementos como súper-capacitores y bancos de baterías, bajo condiciones operativas variantes con el tiempo. Sin embargo, aún existen discrepancias sobre la pertinencia y eficacia de este tipo de modelos. Por su parte, en [2] se emplea un modelo generalizado para el modelado del SMES y otros dispositivos de almacenamiento de energía a través de un conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales lineales.

Ante la diversidad de propuestas que se encuentran para representar las cargas mencionadas con anterioridad, surge la siguiente pregunta de investigación: *¿será posible definir una metodología que permita definir modelos de carga para representar el comportamiento de los vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía?*

1.2 Objetivos de la tesis

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para la estimación de modelos de carga del vehículo eléctrico y sistemas de almacenamiento de energía.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las principales configuraciones empleadas en la representación de vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía.
- Implementar en entorno de simulación las configuraciones analizadas.
- Definir modelos de carga pertinentes para cada uno de los elementos de carga analizados.
- Estimar los modelos de carga seleccionados empleando el enfoque basado en mediciones bajo diferentes condiciones operativas.
- Determinar la capacidad de generalización de los modelos obtenidos y analizar cuantitativamente la pertinencia y precisión de los modelos propuestos.

1.3 Justificación

El presente estudio está encaminado en abordar las problemáticas clásicas del modelado de carga [10]; específicamente al emplear estrategias basadas en mediciones, pero al considerar nuevos elementos de carga, como los vehículos y el SMES presentes en los sistemas eléctricos actuales.

La implementación de este tipo de estrategias se hace posible, debido a la disponibilidad de mediciones a lo largo de los sistemas eléctricos y al creciente interés del operador de red de monitorear los estados operativos del sistema para ejercer tareas de control.

De otra parte, la estimación de modelos de carga para vehículos eléctricos y dispositivos de almacenamiento se justifica, dado que se consigue realizar estudios en sistemas con alta penetración de estas tecnologías, así como el impacto de la inclusión de las mismas en las redes actuales.

1.4 Aportes del proyecto de grado

Los aportes de esta tesis se presentan a continuación:

- Desarrollo e implementación de una metodología de estimación de modelos de carga basada en mediciones para cargas como estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos y sistema de almacenamiento de energía magnética por súper conducción (*SMES*).
- Desarrollo de una técnica de muestreo *Latin hypercube* para la correcta representación del espacio total de los parámetros de los modelos de carga a partir de un conjunto de datos reducido.
- Implementación mediante simulación de dispositivos de carga modernos como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía, como el *SMES*, a partir del diseño del control del convertidor en fuente de tensión (*VSC*) como interface entre la red AC y las baterías para el caso de los vehículos, o el convertidor DC-Chopper para el *SMES*.
- Propuestas de indicadores basados en el error para la validación de los resultados obtenidos.

Los productos que se obtienen de la investigación son:

J. Gil-Aguirre, S. Pérez-Londoño, J. Mora-Flórez, “Analysis of proposed load models for electric vehicles” Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica SICEL, Universidad Nacional de Colombia, Vol. 9, 2017. ISSN electrónico 2357-6618.

J. Gil-Aguirre, S. Pérez-Londoño, J. Mora-Flórez, “Load model estimation strategy for electric vehicle” Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica SICEL, Universidad Nacional de Colombia, Vol. 9, 2017. ISSN electrónico 2357-6618.

J. Gil-Aguirre, S. Pérez-Londoño, J. Mora-Flórez, “A measurement-based load modeling methodology for electric vehicle fast charging stations”. Enviado a Electric Power System Research.

1.5 Estructura del documento

Los capítulos restantes del documento se dividen de la siguiente forma:

En el capítulo dos, se presentan todos los aspectos teóricos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la investigación. En términos generales, se presenta una teoría básica sobre los modelos de carga debidamente referenciados, así como el estado del arte del tema de investigación.

El capítulo tres plantea una revisión sobre las configuraciones más utilizadas en el diseño de los controles para el convertidor VSC, donde se presenta el desarrollo matemático que siguió con el propósito de adaptar dicho convertidor con los vehículos eléctricos y el sistema SMES.

En el capítulo cuatro se describe la metodología de estimación de parámetros y selección de modelos de carga para los sistemas descritos en el capítulo tres, y se presenta una explicación detallada de cada una de las etapas y tareas seguidas por el algoritmo.

El capítulo quinto presenta los sistemas de prueba y los escenarios propuestos para la estimación y selección de los modelos de carga, además se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo seis se exponen las conclusiones de la investigación, así como las recomendaciones y trabajos futuros.

2

Aspectos teóricos

En este capítulo se presentan los conceptos básicos necesarios para la implementación de la metodología de estimación de modelos de carga, específicamente por medio de la estrategia de modelado basada en mediciones, es necesario conocer los conceptos de carga y modelo de carga, así como los modelos más empleados en la literatura para el modelado de los vehículos eléctricos y del sistema *SMES*.

2.1 Conceptos sobre modelado de carga

La carga es una porción del sistema de potencia que no está representada explícitamente por un modelo, sino más bien, es considerada como un único elemento consumidor de potencia; el cual se halla conectado a un barraje de la red [10]. De esta forma, se denomina componente de carga al equivalente de la agregación de todos los elementos de carga que son de un tipo específico o similar. Por otro lado, si se tiene una composición fraccionada de la carga por medio de diversos componentes de carga, surge el término composición de carga. Adicionalmente, si se conocen parámetros de la carga, tales como factor de potencia, variaciones de potencia activa con la tensión, entre otros, se define la característica de carga [10].

Modelos de carga y su clasificación

Un modelo de carga es la representación matemática de la relación entre la tensión en un barraje (magnitud y frecuencia) y la potencia (activa y reactiva) o el flujo de corriente en el barraje de carga [10]. De acuerdo con [11] los modelos de carga se pueden clasificar por sus características estáticas y dinámicas. El modelo de carga estático es aquel que expresa la potencia activa y reactiva en función de la magnitud de la tensión y la frecuencia. Por su parte, el modelo de carga dinámico es aquel que expresa la potencia activa y reactiva en función de la magnitud de tensión, la frecuencia y el tiempo. Dicho modelo se puede representar en ecuaciones diferenciales o en diferencia [10]. De acuerdo con la clasificación de los modelos de carga, en [12] se realiza una revisión bibliográfica sobre las estructuras de los modelos de carga, en donde se identifica que para el modelado de carga con estructuras estáticas, se suelen emplear los modelos de carga polinomial y exponencial, mientras que para representar características dinámicas, los más empleados son los de recuperación exponencial y el modelo de carga compuesto.

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas formulaciones típicas en modelos estáticos y dinámicos.

2.1.1 Modelos estáticos

A. Modelo polinomial o ZIP [10]: Este modelo representa la carga como una combinación de carga de potencia constante, corriente constante e impedancia constante, como se muestra en (1) y (2).

$$P = P_0 \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Donde a_0, a_1, a_2 y b_0, b_1, b_2 son los coeficientes de potencia, corriente e impedancia constante, para P y Q respectivamente.

Los coeficientes del modelo polinomial deben satisfacer la condición dada en (3) y (4) para asegurar que a tensión nominal se obtenga potencia nominal.

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 \quad (3)$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1 \quad (4)$$

B. Modelo de carga exponencial [10]: En este modelo estático, la potencia activa y reactiva consumida por la carga se representa según (5) y (6) respectivamente

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (5)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (6)$$

Donde P_0 y Q_0 son las potencias activa y reactiva nominales, V_0 es la tensión nominal del barraje. Finalmente, α y β son los parámetros de la carga exponencial. Estos parámetros dependen de los elementos conectados al barraje. Algunos casos particulares se obtienen cuando $\alpha, \beta = 0, 1, 2$, que corresponden a cargas de tipo: potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente. Adicionalmente, se puede incluir el efecto de la frecuencia en el modelo de carga como se muestra en (7) y (8).

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (7)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (8)$$

Donde K_{pf} y K_{qf} son los parámetros de sensibilidad ante variaciones en la frecuencia de la red, los cuales afectan tanto la potencia activa con la potencia reactiva de la carga.

2.1.2 Modelos dinámicos

A. Modelo de carga de recuperación exponencial

Este modelo dinámico de carga fue descubierto experimentalmente del análisis del comportamiento de la carga en subestaciones bajo perturbaciones en tensión [13]. Este autor descubrió que ante una variación del tipo escalón unitario en la tensión, la potencia activa y reactiva consumida por la carga tiene una respuesta de tipo exponencial. Este comportamiento se modela a partir de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden como se muestra en (9) y (10).

$$T_p \frac{dx_p}{dt} = -x_p + P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \quad (9)$$

$$P_d = x_p + P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}}$$

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = -x_q + Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs}} - Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \quad (10)$$

$$Q_d = x_q + Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}}$$

Donde, x_p, x_q corresponden a las variables de estado para la potencia activa y reactiva, respectivamente, T_p, T_q son los tiempos de recuperación exponencial para la potencia activa y reactiva, respectivamente, N_{ps}, N_{qs} son los exponentes asociados a la respuesta estacionaria de la carga, N_{pt}, N_{qt} son los exponentes asociados a la respuesta transitoria de la carga, P_0, Q_0 corresponden a las potencias activas y reactiva nominales, respectivamente, P_d, Q_d son las potencias activa y reactiva demandada por la carga, V es la tensión en la carga y finalmente V_0 es la tensión en la carga en el estado de pre-falla.

B. Modelo compuesto de carga

En este modelo dinámico, la carga se representa como una combinación de un modelo estático de carga polinomial y un modelo de motor de inducción. La motivación para usar el modelo del motor de inducción para la representación dinámica, es el gran número de cargas de este tipo que se encuentran en los sistemas de distribución [11]. Este modelo fue propuesto inicialmente por [14], y su estructura se muestra en la figura 1.

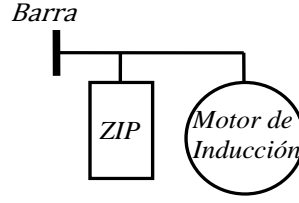


Figura 1. Estructura del modelo compuesto de carga.

La representación del modelo de carga se lleva a cabo por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales como se muestra en (11) y (12), en este caso, se utiliza el modelo de motor de inducción de tercer orden.

$$\begin{aligned}
 \frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (w - 1)E'_q & (11) \\
 \frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (w - 1)E'_d \\
 \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{2H} [(Aw^2 + Bw + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \\
 I_d &= \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\
 I_q &= \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)] \\
 T' &= \frac{X_r + X_m}{R_r} & (12) \\
 X &= X_s + X_m \\
 X' &= X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \\
 A + B + C &= 1
 \end{aligned}$$

Donde E'_d es la tensión interna en el eje directo, E'_q es la tensión interna en el eje de cuadratura, ω es la velocidad mecánica, I_d e I_q son las corrientes en el estator en el eje directo y cuadratura, respectivamente. R_s , X_s , X_m , R_r y X_r son la resistencia del estator, reactancia del estator, reactancia de magnetización, resistencia del rotor y reactancia del rotor, respectivamente. T_0 Es el torque de carga en estado estable, H es el coeficiente de inercia, y A , B , C son coeficientes del torque de carga. Con el objetivo de acoplar el modelo estático y dinámico, se introducen los parámetros K_{pm} , K_{qm} como se muestra en (13).

$$\begin{aligned}
 K_{pm} &= \frac{P_m}{P_0} & (13) \\
 K_{qm} &= \frac{Q_m}{Q_0}
 \end{aligned}$$

Estos parámetros relacionan la potencia consumida por el motor de inducción con la potencia total consumida por el modelo compuesto. Por lo tanto, tienen que satisfacer la relación dada en (14), (15)

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 - K_{pm} \quad (14)$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1 - K_{qm} \quad (15)$$

La componente estática puede ser modelada a partir de las ecuaciones empleadas para el modelo ZIP, como se muestra en (16) y (17)

$$P = P_0 \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$Q = Q_0 \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (17)$$

2.2 Estrategias de modelado de carga

Para la obtención de los modelos de carga se utilizan dos enfoques: uno basado en componentes y otro basado en mediciones.

2.2.1 Estrategia de modelado basada en componentes

Esta estrategia se basa en la recolección de la información sobre el tipo y la composición de la carga conectada a un barraje [10]. La estrategia basada en componentes requiere de la siguiente información:

- Composición típica de las cargas (fracción de la potencia que consume cada componente de carga).
- Mezcla de las diferentes clases de cargas en cada barraje.

El propósito de contar con dicha información, radica en desarrollar un modelo de carga mediante la agregación de modelos individuales de los componentes que forman la carga en cuestión [10].

2.2.2 Estrategia de modelado basada en mediciones

La estrategia de modelado de carga basado en mediciones, aprovecha la información obtenida de las unidades de monitoreo en los sistemas eléctricos, relacionada con las variaciones de potencia activa y reactiva, ante cambios de nivel de tensión o frecuencia en una o varias barras específicas [12]. A partir de dicha estrategia, se logra estimar los parámetros de un modelo de carga propuesto para representar el comportamiento real de la carga. El procedimiento de modelado basado en mediciones, consta fundamentalmente de dos pasos, como se muestra en la figura 2. En donde inicialmente se define la estructura del modelo de carga, y posteriormente, mediante un proceso de ajuste de parámetros, por medio de un algoritmo de optimización, se determina el conjunto de parámetros que al ser evaluados en la estructura propuesta, ajustan de manera satisfactoria los valores simulados con los valores medidos.

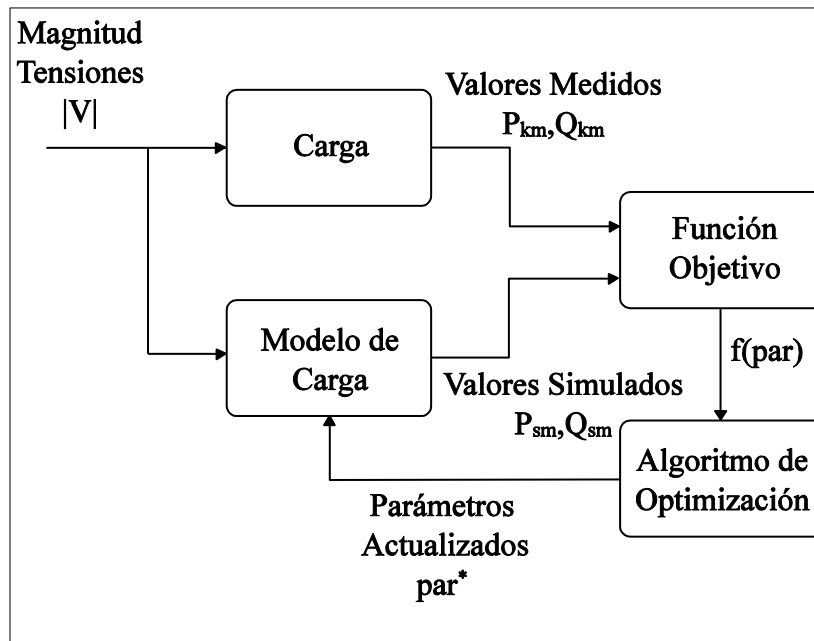


Figura 2. Estrategia de estimación por mediciones [15]

Luego de que se presenta una perturbación en el sistema de potencia, se obtienen el conjunto de mediciones V , P_{km} y Q_{km} , que corresponden a la respuesta que se presenta en la carga. La medición de tensión se emplea para calcular la respuesta del modelo tanto en potencia activa como reactiva, notadas como P_{ks} y Q_{ks} respectivamente. Los valores medidos y simulados se emplean para evaluar la función objetivo del problema de optimización. A partir de esta evaluación, el algoritmo de optimización actualiza los parámetros del modelo de carga par , hasta minimizar la función objetivo [15].

Entre algunos de los casos donde se emplean metodologías basadas en mediciones se tiene a [16], donde se identifican los parámetros de un modelo compuesto de carga heterogéneo en su composición (carga dependiente de tensión como parte estática y motor como parte dinámica), utilizando mediciones de tensión en los nodos de carga para el modelo adaptativo. Para dicho estudio, se requiere que el sistema de potencia sea excitado por perturbaciones derivadas de eventos normales de operación y por contingencias [17]. Por su parte, en [18] se estima un modelo de carga compuesto a partir de mediciones de campo. La metodología allí propuesta consiste en determinar los parámetros del modelo al emplear una técnica de identificación multi-curva y al igual que en el presente estudio de investigación, se analiza la capacidad de generalización de dicho modelo mediante la técnica de validación cruzada. En [19] se realiza un estudio a nivel experimental de modelado de carga mediante las mediciones que se obtienen de las unidades de medición síncrono-fasoriales ó *PMUs*, al considerar modelos estáticos y dinámicos. En este caso se concluye que si bien, los mayores errores de estimación fueron generados por los modelos estáticos, éstos son de más fácil implementación y análisis, debido a que presentan menor número de parámetros. De manera tal, que debe existir un balance tanto con la exactitud de la estimación como en la complejidad del modelo.

En cuanto a los algoritmos que se han empleado para estimar los parámetros de modelos de carga, se reconocen de gran variedad, tanto lineales como no lineales, entre ellas se encuentran:

algoritmos de mínimos cuadrados, técnicas de optimización lineal y no lineal, algoritmos evolutivos, entre otros [20].

- **Algoritmo de optimización Búsqueda tabú**

En el trabajo de investigación que aquí se presenta, se hace uso de la técnica metaheurística conocida como Búsqueda Tabú (*Taboo Search* ó simplemente *TS*) cuya característica distintiva es el uso de la memoria adaptativa y de estrategias especiales de resolución de problemas, el cual fue originalmente propuesto por [21]. Se define como una metaheurística que se superpone a una técnica de búsqueda y que se encarga de evitar que dicha técnica caiga en óptimos locales prohibiendo (o en sentido más amplio, penalizando) ciertos movimientos. El propósito de clasificar ciertos movimientos como prohibidos (o tabú) es para evitar que se caiga en ciclos durante la búsqueda. Sin embargo, un movimiento pierde su estatus de prohibición después de un periodo de tiempo relativamente corto, volviéndose después nuevamente accesible [22].

Desde la perspectiva de la Inteligencia Artificial, la búsqueda tabú trata de emular (de manera somera) el comportamiento de una persona. Es bien sabido que los humanos poseemos un avanzado mecanismo de intuición que nos permite operar aún con información mínima o nula, pero por lo general solemos introducir un elemento aleatorio (probabilístico) en dichas decisiones, lo cual promueve un cierto nivel de inconsistencia en nuestro comportamiento. La tendencia resultante en estos casos suele desviarnos de una cierta trayectoria preestablecida, lo cual algunas veces puede ser fuente de errores, pero en otras ocasiones puede llevarnos a una solución mejor [22].

Entre las desventajas de este tipo de búsqueda, en [23] se plantea que el algoritmo *TS* presenta dependencia con el punto de inicio, donde un buen inicio puede ayudar a encontrar soluciones de alta calidad, mientras que un punto inicial de baja calidad reduce la velocidad de convergencia del método. En consecuencia, y como se amplía en el capítulo 4, la utilización de la búsqueda tabú también requiere la implementación de una estrategia de muestreo que potencialice el algoritmo de búsqueda y que asegure la correcta inicialización del método de optimización.

- **Estrategia de muestreo Latin Hypercube**

La estrategia de muestreo *Latin hypercube* fue propuesta inicialmente por [24], la cual es una forma de muestreo estratificado que puede emplearse en problemas de optimización de múltiples variables, para operar en conjunto con los métodos de solución, ya que se consigue encontrar puntos de inicialización muy eficientes. Su funcionamiento consiste en suponer un espacio solución con d dimensiones, dicho espacio se divide en n subdivisiones de igual tamaño para cada una de las dimensiones. Posteriormente, se toma un conjunto aleatorio de n muestras, donde cada muestra solo puede pertenecer una única vez al sub-espacio formado de la división uniforme del espacio solución, y el cual es paralelo a los ejes de coordenadas donde se ubican las variables que acotan el espacio solución [25] (parámetros de modelos de carga para el caso de estudio que se plantea en la investigación aquí presentada). De esta forma se logra estratificar en simultáneo los márgenes de variación de los parámetros, garantizándose un muestreo uniforme y una reducción en los tiempos de búsqueda del método de optimización.

2.3 Cargas en sistemas de potencia modernos

La capacidad que tienen los sistemas de almacenamiento de energía (*Energy Storage Systems*, o simplemente *ESS*) de mejorar las características de estado transitorio de los sistemas de potencia actuales, así como la posibilidad de aumentar las cualidades en la continuidad del suministro en las redes modernas, debido a que éstas cuentan con alta penetración de energías renovables [2], han contribuido a la aparición y rápido desarrollo de nuevos elementos en los sistemas de potencia modernos [26],[27]. Entre los dispositivos de mayor relevancia se encuentran las baterías (*Battery Energy Storage ó BES*). Adicionalmente, se tiene el Almacenamiento por Aire Comprimido (*Compressed Air Energy Storage ó CAES*), el Almacenamiento de Energía Magnética por Superconducción (*SMES*), el Almacenamiento de Energía en Capacitor Electroquímico (*ElectroChemical Capacitor Energy Storage ó ECES*) y el Almacenamiento por Volante de Inercia (*Flywheel Energy Storage ó FES*). Como puede notarse, el modelado de este tipo de dispositivos puede ser complejo debido a la gran cantidad de tecnologías existentes en la actualidad. Por otra parte, se encuentran los vehículos eléctricos, los cuales son fundamentalmente, una batería móvil que puede conectarse en cualquier parte de la red y de la que se tiene gran incertidumbre acerca del estado energético inicial de sus baterías.

A continuación, se presenta una descripción de las características de dos de los dispositivos de mayor proyección y viabilidad, que se encuentran masivamente en las redes eléctricas actuales, estos son el vehículo eléctrico y el sistema SMES.

2.3.1 Sistema de almacenamiento de energía magnética por súper conducción (SMES)

El sistema de almacenamiento de energía magnética por súper conducción o *superconducting magnetic energy storage (SMES)* es un sistema de almacenamiento de energía donde se guarda la energía en forma magnética en una bobina superconductora refrigerada a temperaturas criogénicas. La energía con la que inicialmente se carga el SMES es del tipo alterna (AC), pero se mantiene almacenada en forma de una corriente circulante de naturaleza continua (DC) [28].

En el diseño de las bobinas para *SMES*, se tienen en cuenta gran variedad de factores, con el propósito de obtener el mejor desempeño al menor costo[29]. Aspectos como el tipo de configuración del bobinado, la capacidad de almacenamiento de energía, materiales de manufactura y temperatura de operación son algunos de los factores de diseño más estudiados por expertos y fabricantes [30]. Una de las configuraciones más utilizadas en el diseño de la bobina súper conductora es la del tipo solenoide [31], debido a su sencillez y eficiencia en términos económicos. El valor de la inductancia de la bobina (L), así como la tensión y corriente máxima (V_{\max}) e (I_{\max}) del sistema de acondicionamiento de potencia *Power Conditioning Systems (PCS)*, determinan la energía o potencia máxima que el SMES puede absorber o inyectar a la red [30]. De acuerdo a la topología, existen tres tipos de *PCS* para el sistema SMES, los cuales son *PCS* basados en tiristores, *PCS* basados en convertidores en fuente de tensión y *PCS* basados en convertidores en fuente de corriente [30]. Algunas de las comparaciones de este tipo de configuraciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de tecnologías para el SMES[30]

Criterios	Topologías más empleadas para el Sistema SMES		
	SMES basado en Tiristor	SMES basado en VSC	SMES basado en CSC
Capacidad de control de potencia activa y reactiva	Exhibe un factor de potencia en atraso y presenta armónicos de bajo espectro causados por la señal de disparo de los tiristores. Por lo tanto, se puede controlar la potencia activa y en menor medida la potencia reactiva. Los controles de potencia activa y reactiva no son independientes.	Permite un control independiente del flujo de potencia activa y reactiva que fluye entre la bobina superconductora y el sistema de potencia. Además, se logra inyectar reactivos a la red, aún, con baja o nula corriente en la bobina.	Permite un control independiente del flujo de potencia activa y reactiva entre la bobina y la red. Sin embargo, puede suplir un alto nivel de potencia reactiva de naturaleza capacitiva, mientras que la inductiva depende de la capacidad de la bobina.
Estructura de Control	Al tener sólo un módulo AC/DC es más sencillo de controlar.	No sólo incluye un circuito AC/DC, sino también un DC/DC chopper, en consecuencia, el control es más complicado en comparación con el SMES basado en tiristor y el SMES basado en CSC.	Al tener sólo un módulo AC/DC, es más sencillo de controlar. Además, en aplicaciones de alta potencia tiene la ventaja de poderse conectar en paralelo con otros puentes convertidores.
Distorsión Armónica Total (THD)	El <i>THD</i> es más alto en este sistema que en topologías VSC y CSC.	Se obtiene un bajo <i>THD</i> con esta topología.	Se obtiene un bajo <i>THD</i> con esta topología.
Rizado en tensión de la bobina	Se puede aparecer rizado en la tensión de la bobina del SMES.	Se puede aparecer rizado en la tensión de la bobina del SMES.	El rizado en la tensión en la bobina es mucho más pequeño, especialmente, en topologías de 12 pulsos. Esto implica una reducción en las pérdidas de potencia AC en la bobina.

De otra parte, el SMES tiene gran variedad de aplicaciones, debido principalmente, a su operación casi instantánea. Entre las aplicaciones más destacadas se pueden mencionar:

- Elemento almacenador de energía: Un SMES puede estar en la capacidad de almacenar hasta 5000 MWh de energía con una eficiencia de hasta el 95%, y un tiempo de respuesta del orden de los milisegundo para unidades de gran tamaño [30].
- Estabilizador de sistemas: El SMES tiene la capacidad para amortiguar oscilaciones de potencia, al estabilizar la frecuencia del sistema luego de una perturbación [30].

- Control automático de generación: El SMES también se puede desempeñar como una función de control del control automático de generación (AGC), en este sentido, ofrece un error de control de área mínimo [30].
- Mejoramiento de la calidad de la energía: Tiene la capacidad de atender problemas de calidad de la energía, como los huecos de tensión y apagones momentáneos [30].

Otras aplicaciones se detallan en profundidad en el estado del arte realizado para el sistema SMES, presentado en el capítulo dos del presente documento.

La figura 3 ilustra un esquema de un sistema SMES, donde se nota que la interconexión con la red eléctrica, se hace por medio de un convertidor AC/DC, que generalmente, es un convertidor en fuente de tensión, debido a las ventajas que se obtienen, según como se muestra en la tabla 1. Adicionalmente, se observa que la bobina superconductora está confinada en un recipiente, el cual contiene un refrigerante, que puede ser tanto nitrógeno como helio líquido. Finalmente, se conecta un sistema de refrigeración para la correcta disposición del refrigerante.

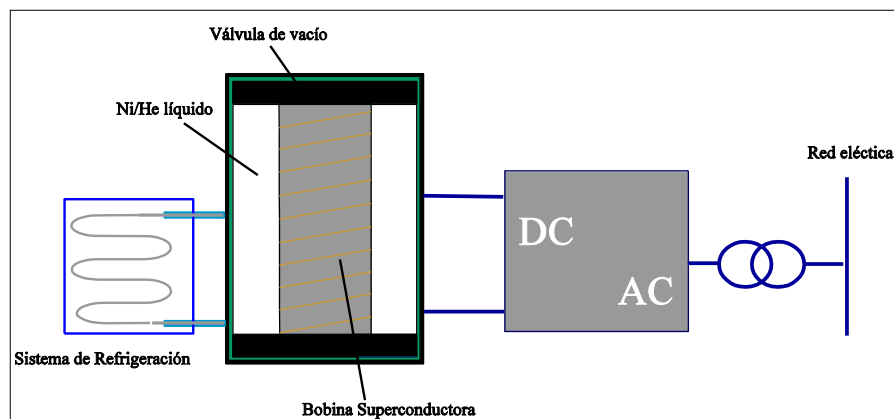


Figura 3. Estructura del sistema SMES [32]

2.3.2 Modelos propuestos para el SMES

Los sistemas SMES tienen gran variedad de aplicaciones en los sistemas de potencia modernos. Entre las más destacadas, se tiene la función del SMES como estabilizador de frecuencia. En estos casos, ante un aumento súbito en la demanda de potencia en las cargas, la energía que está almacenada en la bobina súper conductora se libera hacia la red, para garantizar la estabilidad del sistema. Si por el contrario, se presenta la salida de una gran carga de la red, el exceso de energía debe ser absorbido para asegurar que el sistema regrese al estado estable [33].

Por lo anterior, la estructura del SMES como elemento regulador de la frecuencia se plantea como un compensador adelanto/atraso de segundo orden, como se presenta en la figura 4. La señal de entrada para esta expresión corresponde a la variación en por unidad de la velocidad del rotor de la máquina síncrona para la que el SMES actúa como soporte. Así mismo, esta estructura para el SMES está conformada por la ganancia K_{smes} , un bloque de acción proporcional con la constante de tiempo T_{smes} y dos bloques de compensación de fase. Los bloques con las constantes de tiempo T_1 , T_2 , T_3 y T_4 , generan el adelanto de fase necesario para compensar el retraso existente entre entrada y salida [34].

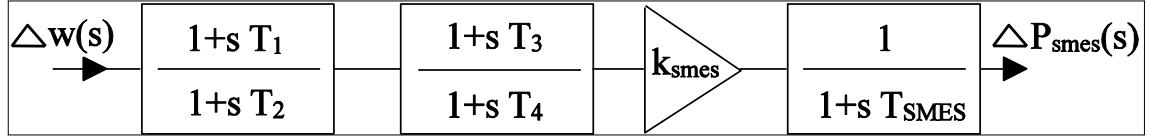


Figura 4. Estructura del sistema SMES.

Por lo tanto, la función de transferencia consta de 6 parámetros, donde K_{SMES} es la ganancia de estabilización y T_1, T_2, T_3, T_4 y T_{SMES} son constantes de tiempo [33].

Otro tipo de modelo del SMES se basa en la teoría de control Hamiltoniana, específicamente en aquella conocida como *port-controlled Hamiltonian* o *PCS*, esta estrategia ofrece la posibilidad de ejercer un control preciso en sistemas que son altamente no lineales, el modelo del SMES se describe mediante el sistema de ecuaciones (18) [35].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \\ y &= g^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \end{aligned} \quad (18)$$

Donde $J(x)$ es una matriz de estructura interna, con la que se representa la estructura interna de conversión de energía de la planta, $R(x)$ es la matriz de amortiguamiento, donde se tiene en cuenta el efecto de la disipación de energía del sistema analizado, $H(x)$ es la función de energía, $g(x)$ es una matriz de interacción del interior con el exterior, en la que se plantea una relación de transferencia interna y externa, u es el vector de estado, y es el vector de salida del sistema.

Este modelo se implementa en sistemas con SMES conectados a la red a través de un convertidor de tres niveles, del tipo T (*Three Level T Type Converter*, ó *3LT²C*) y tiene la característica de mejorar los indicadores de calidad de la energía, al garantizar una inyección de potencia del SMES totalmente libre de armónicos. Adicionalmente, se logra incrementar la estabilidad del sistema.

Finalmente, en [36] se presenta un modelo del SMES alojado en un sistema de máquina síncrona (M_1) conectado a barraje infinito, para garantizar estabilidad y amortiguamiento en la red eléctrica, un esquema del sistema se muestra en la figura 5. Esta aplicación del SMES es particularmente interesante para sistemas de transmisión de gran tamaño, como el sistema Hidro-Quebec, el modelo de dicho sistema se presenta en (19) [36].

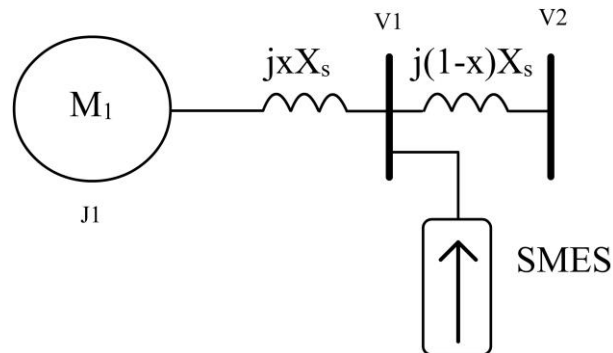


Figura 5. Esquema de sistema máquina síncrona con SMES [36].

$$P = P_s \sin \delta + P_s \frac{I_{smes}}{I_s} \left(x \frac{J}{J_2} \cos \theta - (1 - x) \frac{J}{J_1} \cos(\delta - \theta) \right) \quad (19)$$

Donde P es la potencia que se inyecta o absorbe por el SMES, P_s es la potencia máxima transferida sin el SMES, I_{smes} y θ es la magnitud y el ángulo de fase de corriente del SMES, x es la ubicación donde se encuentra el SMES, si se considera que toda la longitud del alimentador que conecta las dos máquinas mide una unidad de longitud, J_1 y J_2 representan la inercia de las máquinas 1 y 2 y J es la inercia equivalente de ambas máquinas.

2.3.3 El vehículo eléctrico

El vehículo eléctrico se define como todo vehículo de carreteras que involucre propulsión eléctrica. Esta definición abarca tecnologías como vehículos de baterías (BEV), vehículos eléctricos híbridos (HEV), vehículos de celda de combustible (FCV); así como combinaciones de estas tecnologías, como son el vehículo híbrido eléctrico conectable (PHEV) y el vehículo híbrido de celda de combustión (PFCV) [37]. En los últimos años, tanto la comunidad científica como la manufacturera presentan especial interés en la tecnología HEV, la cual combina un sistema típico de tracción, con un sistema de propulsión eléctrica adicional, el cual consiste en una unidad de almacenamiento de energía, o batería, un actuador de torque eléctrico, representado por un motor eléctrico y un dispositivo de acople entre el componente mecánico y eléctrico [38]. En este sentido, esta es la mayor ventaja con la que cuenta esta tecnología, pues es posible entregar la potencia requerida por el sistema de tracción de las ruedas bien sea desde el motor de combustión interna, o desde el motor eléctrico. Esta característica permite la reducción en el consumo de combustible. En la figura 6, se observa que en el modelado de los vehículos eléctricos se hacen consideraciones tanto en la parte mecánica como en la eléctrica del vehículo eléctrico. Por ejemplo, se puede incluir el sistema batería, inversor y motor eléctrico, así como el efecto de los engranajes y la tracción de las ruedas en el modelo del vehículo eléctrico.

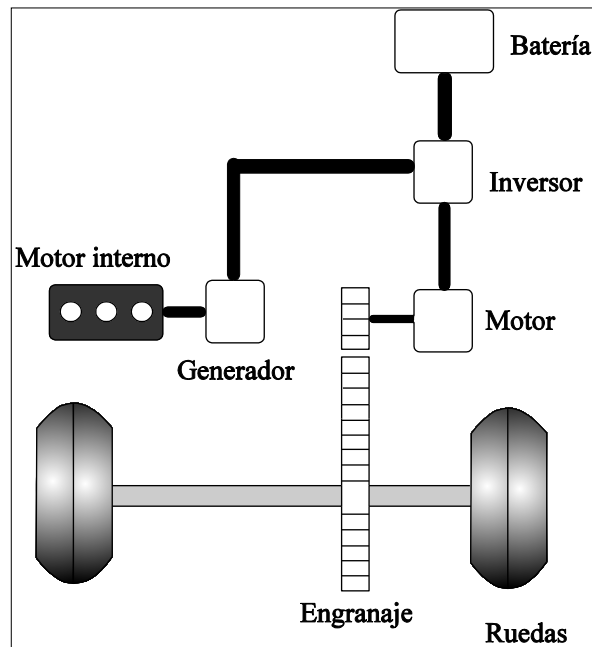


Figura 6. Estructura vehículo eléctrico híbrido [38]

En este sentido, son abundantes los entornos de simulación y paquetes de pruebas, empleados para analizar la interacción entre las componentes mecánica y eléctricas del vehículo eléctrico. Algunas de las herramientas más destacadas para estudiar el desempeño tanto físico como eléctrico del vehículo eléctrico son: Simple EV simulation (*SimpleEV*) desarrollado en el laboratorio nacional de ingeniería, del departamento de energía (*Department of Energy*. DoE) ubicado en Idaho, Estados Unidos, PSAT desarrollado en el laboratorio Nacional de Argonne, también con el apoyo del DoE de los Estados Unidos, CarSim de la compañía *AeroVironment*, JANUS de la universidad de Durham, *ADVISOR* del laboratorio nacional de energía renovables (NREL) de los Estados Unidos y Vehicle Mission Simulator, entre otros [39]. En el caso particular de herramientas como *ADVISOR* (*ADvanced VehIcle SimulatOR*) [40], el usuario puede realizar modificaciones sobre los siguientes parámetros del vehículo: potencia del motor de combustión interna, capacidad de la batería, relación de transmisión de la caja de cambios, radio de las llantas, masa del vehículo, límite máximo de velocidad, eficiencia en la transmisión del torque, entre otras. Por su parte, el paquete PSAT (*Powertrain System Analysis Toolkit*), emplea el entorno de Matlab/simulink, en donde en términos generales, se analiza la eficiencia del combustible, al considerar factores como la fricción del aire sobre el vehículo, y las condiciones del terreno [41].

Sin embargo, este tipo de consideraciones se salen del alcance del trabajo de investigación aquí presentado, y por tal motivo, los modelos que en él se analizan, corresponden a las relaciones entre las variables eléctricas más significativas que interfieren en la forma como se cargan los vehículos; algunas de estas son tensión y corriente en las baterías, estado de carga (*State of Charge ó SoC*) de las mismas, características del convertidor DC que interconecta el *DC-link* con la batería y finalmente, el tiempo de duración de la recarga, el cual depende fundamentalmente, del *Soc* inicial de la recarga, y del tipo de la tecnología de recarga del

vehículo eléctrico. De esta forma, se presenta la evolución de la tecnología del vehículo con base en las diferentes variaciones introducidas por los fabricantes.

A. Micro HEV

En el micro HEV, el motor eléctrico, en forma de un pequeño alternador integrado, se usa para el apagado del motor cuando el vehículo realiza una parada, y para su encendido y puesta en marcha, cuando el conductor deja de accionar el pedal de freno. Una vez el vehículo inicia su desplazamiento, el motor de combustión se encarga de generar la potencia. Ejemplo de estos vehículos se tienen el BMW series 1 y 3, Fiat 500 SMART car, Peugeot Citroen C3, Ford Focus y Transit y el Mercedes-Benz Clase A [38].

B. Mild HEV

Esta tecnología es muy similar a la del micro HEV, en donde se incrementa el tamaño del alternador integrado, y se adiciona una batería que permite asistencia en potencia en la propulsión del vehículo. Los incrementos en la eficiencia del combustible se estiman entre un 20 y 25%. Algunos de estos vehículos son el BMW serie 7, Chevrolet Malibú con eAssist, Honda Civic y el Mercedes-Benz S400 [38].

C. Full HEV

En los vehículos Full HEV, tanto el motor como la batería son significativamente mucho más grandes que para el caso micro y mild. Por tal motivo, dependiendo de la demanda en potencia del vehículo, el motor eléctrico puede ser la única fuente de propulsión. En este caso, la eficiencia en consumo de combustible asciende a los 40-45%. El Chevrolet híbrido Tahoe, el Toyota Prius, Ford Cmax, Honda CR-Z y Kia Optima hacen parte de este grupo [38].

D. Vehículo híbrido enchufable o Plug-in HEV (PHEV)

En términos generales, el vehículo PHEV dispone de la misma configuración que los Full HEV, con la novedad de que poseen un enchufe o clavija exterior para su conexión a la red eléctrica. Sus componentes eléctricos, motor y baterías son mucho más grandes y complejos que sus pares antes mencionados. En consecuencia, tiene la capacidad de garantizar autonomía por largos periodos de tiempo. El Chevy volt, Ford C-max Energi, Porsche Panamera S E-Hybrid, el Toyota Prius Plug-in y algunos modelos Tesla son ejemplos de esta tecnología [38].

El estudio del presente trabajo de investigación, se centra en el modelado de este tipo de vehículos, debido a su interacción con la red eléctrica, y a la posibilidad de disponer de mediciones, específicamente en una estación de carga rápida de vehículos eléctricos.

2.3.4 Modelos propuestos para los vehículos eléctricos

Así como se han presentado diferentes tecnologías en cuanto al diseño y funcionamiento del vehículo eléctrico, también existe gran diversidad en las propuestas de modelos para los mismos. Un ejemplo de ello, son las tres clasificaciones o enfoques para el modelado del vehículo eléctrico, identificadas en la revisión del estado del arte durante la elaboración del presente documento. Las cuales son: modelos basados en estructuras de modelos clásicos, modelos basados en estructuras de modelos derivados y modelos basados en incertidumbre de

variables. Algunos de los modelos empleados en cada una de las clasificaciones se presentan en el planteamiento del problema.

En consecuencia, como el objetivo principal del presente trabajo de investigación está en la estimación y selección de los modelos eléctricos más adecuados para representar la operación de los vehículos eléctricos, sin entrar en el detalle de la variable estocástica de los mismos, los modelos aquí propuestos se enmarcan en la clasificación de modelos con estructuras clásicas y derivadas. Debido a que ambas clasificaciones están fuertemente influenciadas por las estructuras de los modelos polinomiales y exponenciales, se presenta una breve descripción de los mismos.

A. Modelo de carga polinomial

Este modelo también se conoce como modelo *ZIP*, ya que está compuesto por los componentes de impedancia constante (*Z*), corriente constante (*I*) y potencia constante (*P*) [11]. La relación entre la potencia y la magnitud de tensión en este modelo están dadas por (20)

$$P/P_0 = C_1(v/v_0)^2 + C_2(v/v_0) + C_3 \quad (20)$$

Donde P_0 es la potencia activa nominal, v es la magnitud de la tensión de entrada y C_1, C_2, C_3 son coeficientes de impedancia, corriente y potencia constante respectivamente [11].

Este tipo de modelo de carga se destaca en [5] debido a que a diferencia del modelo de potencia constante, este modelo considera el comportamiento del sistema de carga de los vehículos, durante el periodo de carga del mismo, mediante una estrategia de estimación de los parámetros del modelo *ZIP*, ante variaciones en las tensiones de entrada en el lado AC, y al considerar niveles del *SoC* entre 10 y 100%. Los resultados del estudio demuestran que al emplear un modelo del vehículo del tipo *ZIP*, se logra una mejor representación del comportamiento del vehículo eléctrico que con el modelo de potencia constante, para realizar análisis de las pérdidas en sistemas con estas cargas, o para ejecutar flujos de carga que incluyan vehículos eléctricos.

B. Modelo de carga exponencial

La dependencia entre tensión y potencia en algunas cargas se representa con frecuencia por medio de un modelo exponencial [11]. Dicha relación está dada por el modelo de carga exponencial mostrado en (21)

$$P/P_0 = k_1(v/v_0)^{np} \quad (21)$$

Donde v_0 es la tensión nominal del barraje de carga, np y k_1 son los parámetros de característica exponencial. Si np toma valores de 0, 1 o 2, se tiene un modelo de potencia, corriente o impedancia constante respectivamente.

Por otro lado, si se toman otros valores para dicho parámetro, se puede representar la agregación de diferentes tipos de cargas. Por ejemplo, los autores de [1] identifican el comportamiento de

una carga del tipo vehículo eléctrico, como la combinación de una componente de potencia constante y una exponencial, dicho modelo tiene la formulación presentada en (22):

$$P/P_0 = k_{cp} + k_{vd}(v/v_0)^\alpha \quad (22)$$

Donde k_{cp} representa la tasa de variación del componente de potencia constante P_{cp} a la tensión nominal, k_{vd} representa la variación de la componente en tensión P_{vd} . El índice α es un indicador de los márgenes de cargabilidad del sistema de potencia al que se conecta el vehículo [1]. Como conclusión, se destaca que los límites de cargabilidad de las redes con alta penetración de vehículos eléctricos se ven altamente afectados. Por ejemplo, los límites de cargabilidad son menores si se emplea este tipo de estructura, comparados con los límites arrojados al utilizar el modelo potencia constante para representar un vehículo eléctrico conectado a la red.

2.3.5 Característica de carga de vehículos tipo Tesla

Como se ha mencionado, existen gran cantidad de prototipos para los vehículos eléctricos, dependiendo tanto de la tecnología empleada, como del fabricante del mismo, dichas variaciones impactan el diseño y operación de la estación de carga para los vehículos eléctricos, así como los perfiles de carga que se obtienen de las mediciones tomadas del barraje donde se encuentra la estación. Por ejemplo, en la figura 7 se presenta una clasificación de las tecnologías más empleadas en la operación de estaciones de carga lentas, medias o rápidas, dependiendo de la característica AC o DC de la misma instalación.

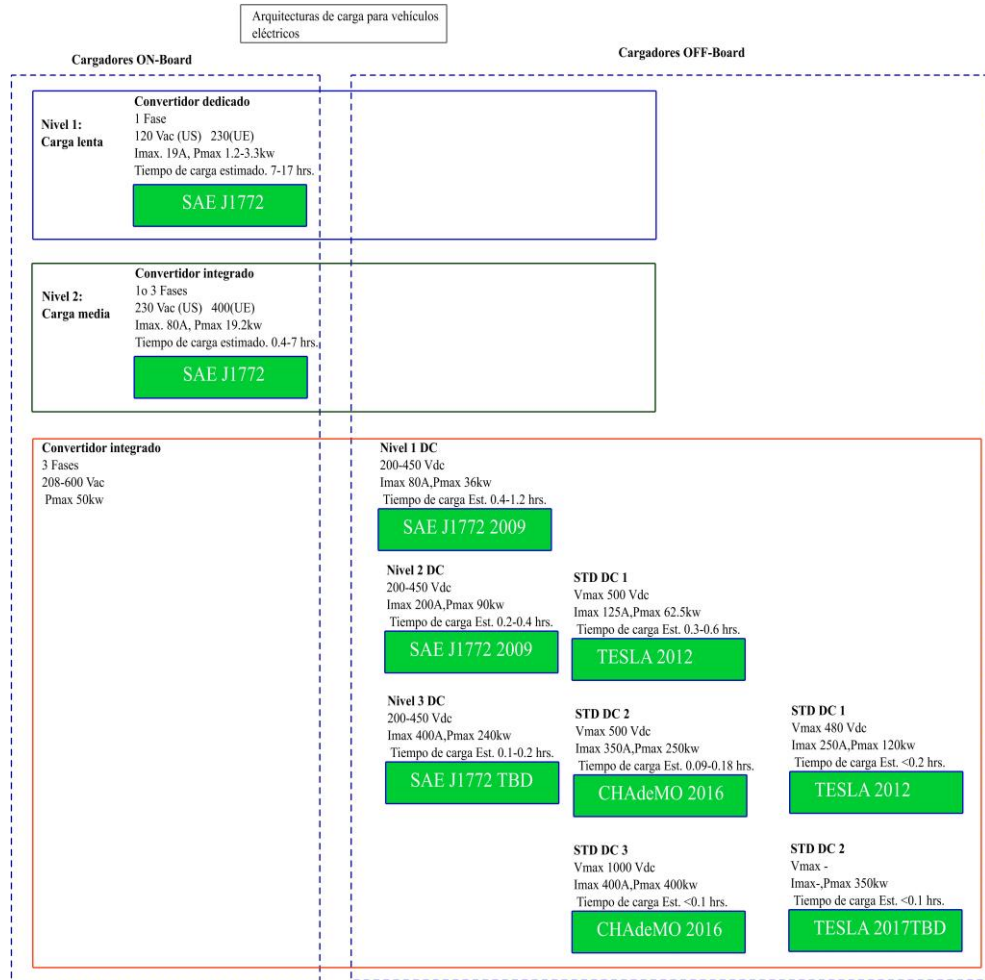


Figura 7. Algunas tecnologías para estaciones de carga de vehículos eléctricos [42].

Como se observa de la figura 7, la tecnología Tesla representa las capacidades y velocidades de carga más altas, por lo que requieren de un tratamiento especial. Debido a lo anterior, en [43] se presenta una formulación básica, (producto de estudios experimentales con estos vehículos), de la característica de carga de los vehículos Tesla. En (23) se presentan dicha formulación, y se aplican en el presente estudio para aproximar el comportamiento de carga de un vehículo Tesla.

$$\begin{aligned}
 P(t) &= P_{max} e^{(-k s(t))} \\
 S(t) &= \left(\frac{1}{E}\right) \int_0^t P(t) dt
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

donde P_{max} es la potencia de carga inicial máxima, k es una constante de decaimiento exponencial de la potencia respecto al estado de carga, E es la capacidad de la batería del vehículo, S_t es el estado de carga para el cual se da el cambio de carga constante a decaimiento exponencial de las baterías.

2.3.6 Estación de carga rápida para vehículos eléctricos

Según lo antes mencionado, las estaciones en DC de carga rápida se caracterizan principalmente, porque cuentan con tiempos de duración de la recarga muy cortos, comparadas con sus similares en AC. En el último tiempo, se han propuesto diferentes estrategias para el desarrollo e integración de estaciones de carga públicas, en las que se hace un énfasis especial en los aspectos como la calidad de la energía; y debido a las altas capacidades manejadas por las mismas, en las técnicas para el suministro de potencia a las baterías.

En términos generales, y como se detalla en capítulos posteriores, en las estaciones DC para carga rápida de vehículos eléctricos se emplea ampliamente el convertidor en fuente de tensión (ofrece grandes ventajas en el control) como interconexión entre la red eléctrica y la estación, y un bus en DC donde se hace la conexión de cada uno de los vehículos eléctricos por medio de los cargadores de baterías, que son fundamentalmente, convertidores DC reductores. Estos convertidores se encargan de adecuar el nivel de tensión, así como de limitar la corriente demandada por las baterías. En este sentido, se debe agregar que la mayoría de las estaciones en DC de carga rápida, utilizan el método de carga de corriente constante- voltaje constante (*Constant Current-Constant Voltage ó CCCV*). En el cual, el ciclo de recarga de la batería está compuesto por dos periodos, en el primero, conocido como corriente constante, la corriente que absorbe la batería se mantiene en un valor constante, hasta que el voltaje en la batería alcance un valor límite o de umbral [44]. En este instante, se da el segundo periodo de carga, denominado voltaje constante, donde la tensión se mantiene en dicho valor límite, mientras que la corriente presenta un decaimiento exponencial, esto se muestra en la figura 8.

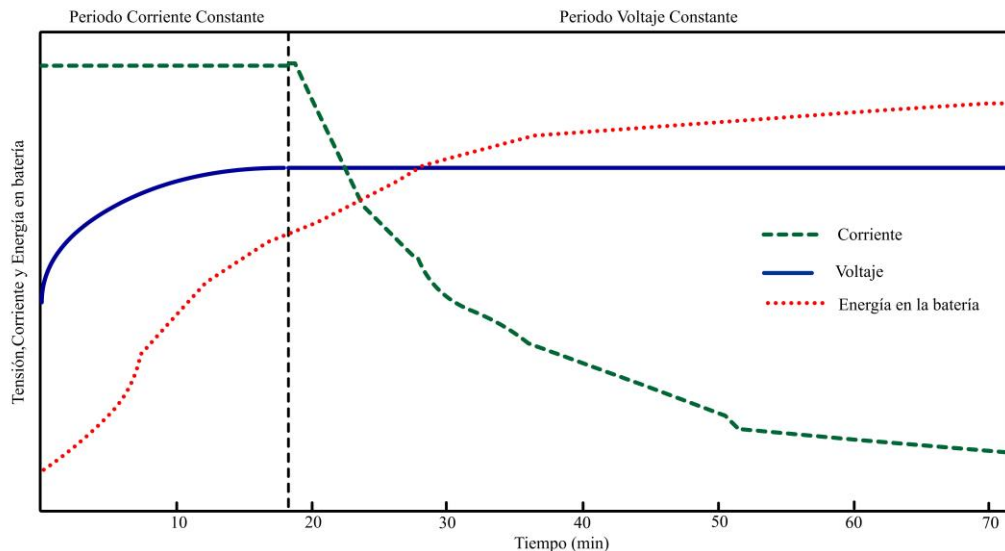


Figura 8. Esquema de carga CCCV [44]

De acuerdo a lo anterior, los autores en [44] proponen que por simplicidad, la potencia demandada por las baterías se puede considerar como constante durante el periodo de corriente constante, debido a las variaciones mínimas en la corriente. Esta aproximación puede realizarse al despreciar el efecto del aumento de la temperatura de las baterías.

2.4 Estado del arte

Los primeros estudios sobre el modelado de vehículos eléctricos coinciden en la inconveniencia de representar dichas cargas no convencionales por medio de modelos de potencia constante, ya que esta formulación no considera el efecto de las baterías, y mucho menos la dinámica del convertidor de interface con la red. Así mismo, se destaca la necesidad de reflejar el impacto que tienen las variaciones de la red sobre la respuesta del vehículo, para realizar estudios más detallados sobre los sistemas que albergan este tipo de cargas. En este sentido, los autores en [45] establecen la dependencia en tensión en terminales de la carga, con la estabilidad transitoria de la red a la que se encuentra conectada, al realizar variaciones que originan oscilaciones electromagnéticas en un sistema de máquina síncrona conectada a bus infinito. A partir de estas observaciones preliminares, los mismos autores proponen en [1] un modelo de carga estático para el vehículo eléctrico, con un componente de potencia constante y otro del tipo exponencial, al considerar el efecto del cargador universal de baterías para el vehículo. Posteriormente se efectúa un estudio sobre los límites de estabilidad del sistema al considerar la penetración de vehículos eléctricos. Se concluye una disminución en los límites de estabilidad y cargabilidad de la red, al considerar dicho modelo para el vehículo, frente a aquellas que modelan al mismo como una carga de potencia constante. En esta misma línea, en [46] se presenta una formulación de un modelo de vehículo para realizar estudios de flujo de carga. En este estudio se comparan las curvas PV para sistemas donde se emplea el modelo desarrollado, el cual tiene una característica exponencial, y un modelo tradicional PQ. Allí se encuentra que los límites de la curva PV para el sistema con el modelo propuesto se estiman más estrechos que el para el modelo PQ.

Por otro lado, en [5] se plantea un modelo de tipo ZIP, donde se estiman los parámetros de este modelo, al ser comparados con mediciones reales de potencias activa y reactiva de los vehículos, ante diferentes niveles de tensión y estado de carga de las baterías de los mismos. Se demuestra que los modelos del tipo ZIP para el vehículo eléctrico describe un modelo más realista de esta carga comparado con el modelo de potencia constante. Una de las aplicaciones más destacadas para este modelo consiste en poder introducirlo en la formulación del algoritmo de flujo de carga Newton-Raphson en sistemas con alta penetración de vehículos eléctricos. De manera similar, en [47] la respuesta en potencia de cuatro diferentes tipos de vehículos eléctricos se aproxima a modelos dependientes de tensión del tipo ZIP, en donde se plantea que dicho comportamiento, no puede ser plenamente aproximado por modelos únicamente dependientes de tensión, sino que hay instantes en los que su comportamiento es caracterizado por modelos de corriente o potencia constante.

De otra parte, en [48] se afirma que no es apropiado el uso de modelos del tipo polinomiales y de recuperación exponencial para representar fielmente el comportamiento de cierto tipo de cargas, ya que se sugiere que dichos modelos son válidos solo para rangos restringidos de operación. Por lo que se propone un procedimiento de identificación con el propósito de evaluar los modelos de carga bajo diferentes condiciones operativas y así, se proponen dos estrategias genéricas de modelado lo suficientemente robustas como para ampliar dicho rango de validez.

Adicionalmente, en [9] se propone que las mejores estructuras para el modelado de los sistemas de almacenamiento de energía son aquellas basadas en parámetros circuitales, ya que se consideran tanto los atributos físicos más relevantes de estos sistemas, como su respuesta dinámica; además de que incluyen todas las no linealidades.

Como se menciona en el planteamiento del problema, los modelos con incertidumbre de variables, también cuentan con gran variedad de propuestas. Por ejemplo en [49] se expone la formulación del modelo del vehículo eléctrico haciendo especial énfasis en las variables estocásticas que afectan al vehículo, por tal motivo dicha formulación tiene en cuenta factores como la clase de vehículo eléctrico, la capacidad de la batería, el *SoC* de la misma y algunos hábitos de manejo, entre los que se destacan el tipo u objetivo del viaje o trayecto, tiempo de conexión, distancia recorrida, frecuencia de recarga diaria y el precio de la energía. En este mismo sentido, los autores en [50] proponen una metodología iterativa con interferencia bayesiana, que permita incluir entradas de característica estocástica, para obtener perfiles de carga para vehículos eléctricos. Por su parte, en [51] se desarrolla un modelo basado en cadenas de Markov para representar el comportamiento de carga de vehículos eléctricos en toda una ciudad. Por lo tanto, los autores asumen tres tipos de perfiles de carga asignados al sitio específico de carga, denotados como: Hogar, Trabajo y Otros. De manera similar, en [52] se propone un método dinámico basado en la estrategia de modelado del agente, combinada con un modelo de evolución a gran escala, donde se considera la agregación de todos los consumos individuales de los usuarios, para obtener un patrón de consumo escalable. Adicionalmente los hábitos de conducción de los mismos usuarios y sus comportamientos, dados por estudios de la dinámica social, se incorporan al modelo basado en agentes para obtener perfiles de carga robustos.

Por su parte el SMES, al contar con unas características tan particulares como lo pueden ser su baja densidad energética (comparado con otros sistemas de almacenamiento de energía como las baterías de aire de litio), y su capacidad para librar su energía almacenada de forma casi instantánea, presenta una gran variedad de aplicaciones en los sistemas eléctricos [53]. En las aplicaciones de calidad de la potencia, el SMES puede desempeñar funciones para mejorar el rendimiento de los sistemas de transmisión AC flexibles (*FACTS*). Los *FACTS*, son aquellos dispositivos conformados por elementos de parámetros concentrados, orientados a mejorar la capacidad de transmisión de las redes mediante acciones de control [54]. En este sentido, la operación conjunta de los *FACTS* y del SMES, adiciona capacidad de almacenamiento al nuevo sistema híbrido, por lo que se potencializa su operación [53]. Otra funcionalidad de SMES consiste en la mitigación de huecos de tensión (*sags* y *swells* de voltaje). Estos huecos tienen la característica de ser bastante cortos en el tiempo (menos de un segundo), pero puede generar inestabilidad en la red. Por lo tanto, al aprovechar la característica casi instantánea del SMES de entregar o absorber potencia, este tipo de aplicación del SMES es altamente promisorio. Autores como [55] y [56] plantean la viabilidad del SMES para compensar hundimientos de tensión, así como desfases en el ángulo de tensión inferiores a un ciclo de onda.

Otro tipo de aplicación para el SMES, es como estabilizador de granjas eólicas. Debido a que los sistemas eólicos son altamente estocásticos, el suministro de potencia no está totalmente garantizado, por lo que se puede producir inestabilidad en los sistemas con alta penetración de dicha tecnología. El SMES puede ayudar a minimizar aquel impacto en tres diferentes aspectos: potencia de salida, frecuencia y tensión. El SMES tiene la capacidad de aplanar la curva de potencia de salida del aerogenerador [57]. La estabilidad en tensión en un sistema con generación eólica puede ser mejorada al incluir un SMES [32]. Finalmente, las oscilaciones en frecuencia en sistemas con máquina síncrona, o en aquellos donde la presencia de la generación eólica es significativa, se puede mitigar al incorporar un sistema SMES. Los autores en [33][58] y [34] analizan esta aplicación particular del SMES.

3

Modelado del convertidor en fuente de tensión

En este capítulo se describen algunos de los componentes fundamentales para el modelado de los sistemas basados en convertidores en fuente de tensión, y las estrategias de control que son comúnmente empleadas para la implementación de sistemas de almacenamiento de energía. Como se verá más adelante, se hace un énfasis especial en la formulación del sistema dinámico del convertidor, ya que dicho sistema es común tanto para el modelado de la estación de carga rápida de vehículos eléctricos, como del sistema SMES. Adicionalmente, se aprovecha este hecho para presentar en detalle las estrategias de control utilizadas para obtener un sistema más sencillo de analizar y por lo tanto fácil de controlar.

3.1 El convertidor en fuente de tensión (*Voltage Source Converter, VSC*)[59]

En la literatura técnica, los convertidores se clasifican según el tipo de subsistema eléctrico, esto es, AC o DC, que interconectan.

Por lo tanto,

- i. Un convertidor DC/AC que interconecta un subsistema DC con un subsistema AC.
- ii. Un convertidor DC/DC o simplemente convertidor DC, que interconecta dos subsistemas DC.
- iii. Un convertidor AC/AC que interconecta dos subsistemas AC.

Un convertidor DC/AC se conoce como rectificador si el flujo de potencia circula desde el lado AC hacia el lado DC. Alternativamente, el mismo convertidor se denomina inversor si el flujo de potencia circula desde el lado DC hacia el lado AC. Existe un grupo de convertidores DC/AC especiales que permiten un flujo bidireccional de la potencia, es decir, que pueden operar tanto en forma de rectificador como en forma de inversor. Entre estos dispositivos, el convertidor más destacado es el convertidor en fuente de tensión *VSC* o *VSI* (*Voltage-Source Converter* o *Voltage-Source Inverter*).

Entre las topologías básicas más empleadas para el VSC, se tiene la configuración monofásica de dos niveles en conexión de medio puente. La cual consiste en una celda de conmutación superior e inferior. Donde cada celda se compone generalmente de un elemento de estado sólido del tipo transistor bipolar de compuerta aislada ó IGBT, en conexión anti-paralela con un diodo.

Si dos sistemas en conexión de medio puente se conectan en paralelo por medio de sus terminales DC, se obtiene una nueva configuración para el VSC, conocida como VSC monofásica de puente completo, o convertidor en puente-H. En la figura 9 se presenta un esquema de un convertidor VSC trifásico de dos niveles. Este tipo de topología también es una extensión del VSC en medio puente, y es la configuración a la cual se le conectan los diferentes elementos de carga (*VSC-based systems*) que se analizan en esta tesis.

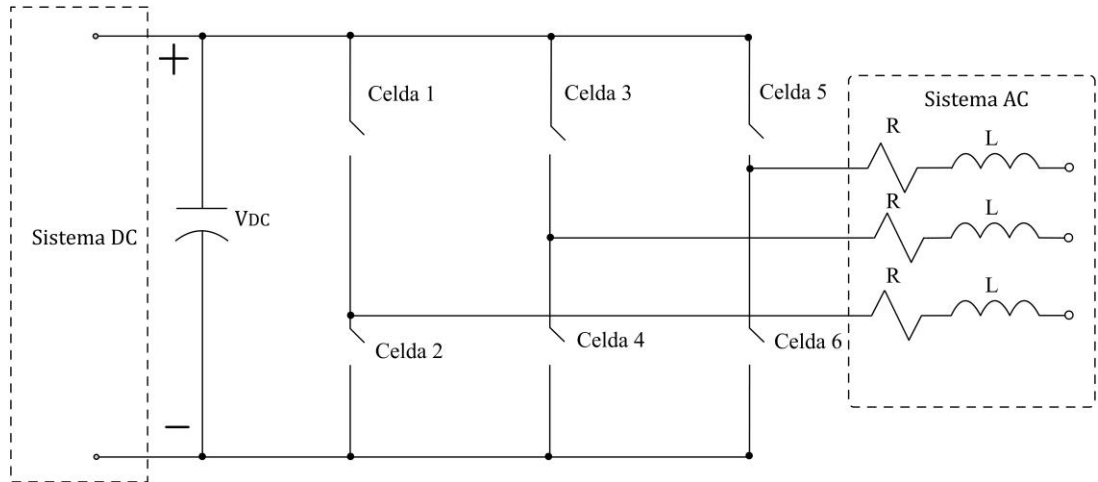


Figura 9. Esquema de un convertidor VSC trifásico de tres hilos, y dos niveles.

Como puede notarse de la figura 9, la interconexión del convertidor al sistema AC, se realiza por medio de un filtro R-L, que, en términos generales, puede ser un transformador trifásico. Las celdas de conmutación están representadas por medio de elementos conmutables, también conocidos como válvulas, y usualmente, corresponden a IGBTs. Finalmente, la interface con el lado DC, se logra por medio de un capacitor de soporte o *DC-link*.

3.2 Clasificación y modelado de los sistemas basados en VSC[59]

Los sistemas basados en VSC se clasifican según el tipo de aplicación específica para la cual se emplean, los cuales son:

- i. Sistema VSC con frecuencia impuesta por la red. Este tipo de sistemas VSC se interconectan con sistemas en AC relativamente grandes. Por tal motivo, la frecuencia de operación del control asociado al convertidor es impuesta por la red.
- ii. Sistema VSC con frecuencia controlada: En este grupo, la frecuencia del sistema AC se regula mediante el control aplicado al convertidor, por lo tanto, la frecuencia de referencia se obtiene de un sistema de control de supervisión.
- iii. Sistema VSC con frecuencia variable: En el sistema de frecuencia variable, el VSC se interconecta con una máquina síncrona, y la frecuencia se trata como una variable de estado de entrada de todo el sistema.

Comúnmente el VSC con frecuencia impuesta por la red se adopta en los casos en los que se realiza control sobre la potencia activa y reactiva, o para controlar la tensión en el *DC-link*. Por

tal motivo, como en la implementación de la estación de carga de vehículos eléctricos y del sistema SMES considerados en esta tesis, el control se ejerce específicamente sobre dichas variables eléctricas, la estrategia de control del VSC utilizada se basa en la aplicación de frecuencia impuesta por la red.

3.3 Estructura de control del sistema VSC con frecuencia impuesta por la red

Para la aplicación de la estrategia de control basada en la frecuencia impuesta por la red, existen dos metodologías principales para controlar la potencia activa y reactiva, P_s y Q_s respectivamente, que se intercambian entre la red y el convertidor. La primera de ellas se conoce como control en modo voltaje o *voltage-mode control*, dicha estrategia se usa predominantemente en aplicaciones de extra-alta tensión o en sistemas de grandes potencias, como los sistemas flexibles de transmisión en AC o FACTS. La otra estrategia, se denomina control en modo corriente *current-mode control*. En este enfoque, se realiza la regulación de la corriente de línea del VSC mediante un esquema de control de corriente, también conocido como lazo de control interno de corriente o *inner loop*. En este esquema de regulación de corriente, el convertidor está protegido contra condiciones de sobre corriente. Entre otras ventajas, se pueden incluir un mejor desempeño dinámico y una alta precisión en el control [60].

En la figura 10, se muestra un esquema del VSC con frecuencia impuesta por la red y con el esquema de control en modo corriente, en este caso se puede observar que las señales de referencia de entrada al compensador de corrientes i_{dref} e i_{qref} son funciones directas de la potencia activa y reactiva de referencia P_{sref} y Q_{sref} [59].

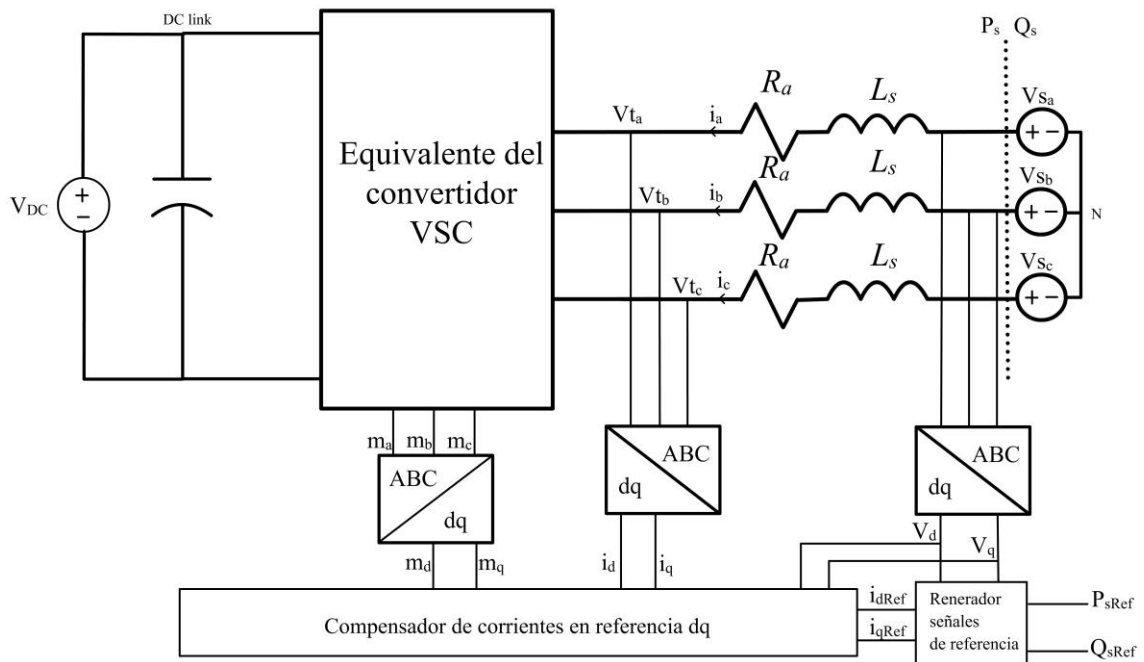


Figura 10. Esquema del control de potencias mediante estrategia de corriente controlada.

Adicionalmente, el control se realiza en el marco de referencia ortogonal dq . En este caso P_s y Q_s se controlan mediante las componentes de la corriente de línea i_d e i_q . Las señales de retroalimentación se convierten al nuevo marco de referencia dq , para luego ser ingresadas a los correspondientes compensadores. Finalmente, las señales controladas se transforman de nuevo al marco referencial ABC, donde pueden ingresar al VSC.

Si se analizan las relaciones de tensión entre los terminales del VSC del lado de alterna y el punto común N, independientemente de los estados de conmutación de los IGBTs, se llega a la expresión (24).

$$Vt_{abc} = R_s i_{abc} + l_s \frac{di_{abc}}{dt} + Vs_{abc} \quad (24)$$

Donde,

$$R_s = \begin{bmatrix} Ra & 0 & 0 \\ 0 & Ra & 0 \\ 0 & 0 & Ra \end{bmatrix} \text{ y } l_s = \begin{bmatrix} Ls & 0 & 0 \\ 0 & Ls & 0 \\ 0 & 0 & Ls \end{bmatrix} \quad (25)$$

El modelo presentado en (24) está planteado en valores de fase instantáneos y su variación se da de forma sinusoidal. En este sentido, diseñar un control para hacer seguimiento a formas de onda sinusoidales, requiere compensadores de orden superior y anchos de banda mayores a los compensadores de señales en DC. Debido a lo anterior, es necesario transformar las señales de control a un sistema equivalente, en el cual se tengan las variables de control en DC. Los marcos de referencia $\alpha\beta$ y dq son algunos marcos de referencia de dos dimensiones más empleados para el control de sistemas eléctricos.

Entre las ventajas más destacadas para emplear marcos de referencia de dos dimensiones, se destacan [59]:

- i. Un problema de control de seguimiento de una variable sinusoidal, se transforma en un problema equivalente de seguimiento en variables continuas. Por ende, controles del tipo proporcional-integrales PI se pueden utilizar en el diseño del control.
- ii. En el marco ABC, los modelos de algunos tipos de máquinas eléctricas presentan alta variación con el tiempo, lo que ocasiona que se presenten acoples mutuos entre las inductancias internas de las mismas. Por el contrario, si dicho modelo se transforma a su equivalente dq , las variaciones en tiempo de las inductancias se convierten en parámetros constantes.
- iii. En términos generales, la gran variedad de componentes del sistema eléctricos se formula en el marco de referencia dq . Por lo que una representación del VSC en dicha referencia, permite hacer usos de metodologías comúnmente empleadas en el análisis de los sistemas eléctricos.

Si (24) se pre-multiplica por la transformada de Park invariante en potencia, se llega a una expresión en la que los términos lineales se pueden transformar en su equivalente $0d$. Dicho desarrollo se muestra en (26) y (27)

$$w(\theta)Vt_{abc} = w(\theta)R_s i_s + w(\theta)l_s \frac{di_{abc}}{dt} + w(\theta)V_{s_{abc}} \quad (26)$$

Donde,

$$w(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Por lo que se obtiene:

$$Vt_{0dq} = R_s i_{0dq} + l_s w(\theta) \frac{di_{abc}}{dt} + V_{0dq} \quad (28)$$

Nótese que, según lo antes descrito, el término de derivadas de las corrientes de línea, no puede ser transformado al marco en dos dimensiones debido a las no linealidades con el operador de transformada. Sin embargo, en el término de las corrientes sigue cumpliéndose la siguiente relación:

$$i_{0dq} = w(\theta) i_{abc} \quad (29)$$

Al derivar la expresión (29) con respecto al tiempo se obtiene (30)

$$\frac{di_{0dq}}{dt} = w(\theta) \frac{di_{abc}}{dt} + \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_{abc} \quad (30)$$

La expresión anterior también presenta el término del operador de Park, pre-multiplicando al vector de derivadas de corriente de línea, si se despeja dicho término para eliminarlo por sustitución en la ecuación (28), y adicionalmente de la ecuación (29) se despeja el vector i_{abc} , al aplicar la transformada de Park inversa, y al sustituir dicho resultado en (28) para eliminar la dependencia de la referencia ABC, se llega a la expresión (31)

$$Vt_{0dq} = R_s i_{0dq} + l_s \frac{di_{0dq}}{dt} - l_s \frac{\partial w}{\partial \theta} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) w(\theta)^{-1} i_{0dq} + V_{0dq} \quad (31)$$

Se procede a definir una nueva matriz J , que tiene la característica de ser constante y anti-simétrica, donde J se define por (32)

$$J = \frac{\partial w}{\partial \theta} w(\theta)^{-1} \quad (32)$$

De (31) se puede observar que la variación de la posición angular con respecto al tiempo es igual a w , y si se introduce en dicha ecuación la nueva matriz, se tiene:

$$Vt_{0dq} = R_s i_{0dq} + L_s \frac{di_{0dq}}{dt} - \omega L_s J i_{0dq} + V_{0dq} \quad (33)$$

Debido a que solo es de interés el análisis en las componentes dq , la ecuación (33) se reescribe al descomponer matemáticamente a J y finalmente se obtiene la ecuación dinámica en el lado AC del VSC en referencia dq , las cuales se muestran en (34)

$$\begin{aligned} Vt_d &= R_a i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega L_s i_q + V_d \\ Vt_q &= R_a i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega L_s i_d + V_q \end{aligned} \quad (34)$$

Donde la formulación dada en (34) es común para todos los sistemas basados en VSC, las expresiones que a continuación se presentan, cambian dependiendo del tipo de elemento de almacenamiento de energía conectado a los terminales DC del VSC y de la señal que se requiera controlar, como pueden ser la tensión en el capacitor de soporte del VSC (como en el caso de la estación de carga de vehículos), o la variación en la frecuencia de la red ante perturbaciones (como en la aplicación del sistema SMES propuesto).

Por otro lado, para el correcto funcionamiento de este esquema de control, se requiere contar con la información tanto de la fase de la tensión, así como de la frecuencia de la red. A este respecto, una de las técnicas más utilizadas para recolectar dicha información, es mediante el lazo de seguimiento de fase [59].

3.3.1 Lazo de seguimiento de fase

Es un control en lazo cerrado con retroalimentación. Aunque existe una gran variedad de PLLs reportados en las bases de datos científicas, casi todos disponen de tres partes características: un detector de fase (PD), un filtro (LF) y un oscilador de voltaje controlado (VCO), estos elementos componen lo que se conoce como lazo de control [61]. Un esquema sencillo de este PLL se presenta en la figura 11.

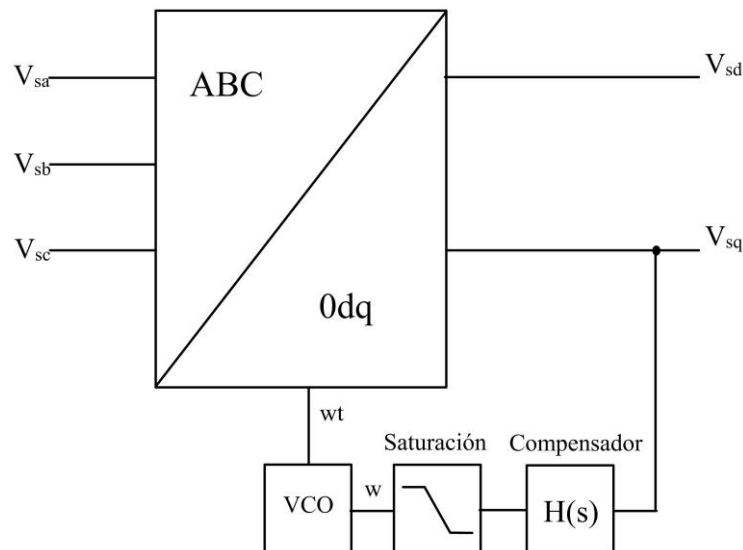


Figura 11. Esquema de un PLL [59]

El lazo de control garantiza que las variables de control en el convertidor estén perfectamente alineadas con la tensión de red, o más concretamente, se dice que el sistema se encuentra en el marco de referencia sincrónico (*Synchronous reference frame SRF*). El compensador $H(s)$ suele ser un control proporcional integral (*PI*), cuyo propósito consiste en alcanzar un error de estado estable nulo entre la diferencia de entrada y salida. Por su parte, el oscilador VCO, es un elemento de reinicio de fase, el cual se encarga llevar el valor de salida de fase a cero, cada que dicho valor vaya a alcanzar el límite de 2π .

Del análisis (34), más la sincronización ofrecida por el PLL, en el control del VSC se consigue obtener un buen desempeño en la modulación de la potencia activa y reactiva.

Una corriente en el convertidor que este en fase con la tensión red, proporciona potencia activa, mientras que una corriente con un adelanto de 90° respecto a la misma tensión, proporciona potencia reactiva al control del convertidor. De acuerdo a esto, se debe emplear un control de corrientes mediante el control de la tensión de entrada al convertidor Vt_{abc} en el sistema ABC, o Vt_{dq} en el marco de referencia equivalente. Dicho control se consigue por medio de dos controles PI, debido al desacople de las variables de control que se logra al trabajar en la referencia dq . A continuación, se presentan los sistemas de control permiten alcanzar los objetivos mencionados:

3.3.2 Control interno de corriente (*Inner Loop current controller*)

En términos generales, el control interno de corriente es una estrategia de control que hace uso de la teoría de control no lineal, específicamente el de la linealización exacta por realimentación, en el que se logra transformar un sistema de control no lineal en una forma lineal equivalente [62].

La potencia compleja en el VSC corresponde a la ecuación (35)

$$s = v_d i_d + v_q i_q + j(-v_d i_q + v_q i_d) \quad (35)$$

Donde la parte real de (35) corresponde a la potencia activa, y la parte imaginaria a la reactiva.

Si se asume que el PLL asegura un sistema SRF, entonces se llega a un resultado muy importante en el control de potencias del sistema, y tiene que ver con el hecho de que, en un sistema perfectamente alineado con el vector de tensión de red, la proyección de la tensión en el eje-q toma un valor de cero, la expresión de potencias toma la formada dada por (36)

$$s = v_d i_d + j(-v_d i_q) \quad (36)$$

Es decir, que tanto la potencia activa como la potencia reactiva se pueden controlar independientemente, si se controlan i_d e i_q , respectivamente.

Si se definen las variables de control u_d y u_q , el sistema de ecuaciones presentado en (34) toma la forma mostrada en (37):

$$u_{d,PI} = R_a i_d + L_s \frac{di_d}{dt} = Vt_d + W L_s i_q - V_d \quad (37)$$

$$u_{q,PI} = R_a i_q + L_s \frac{di_q}{dt} = Vt_q - W L_s i_d - V_q$$

Por lo tanto, las tensiones de referencia en terminales del VSC están dadas por los términos desacoplados que se obtiene de los controladores PI de las corrientes de línea del convertidor, según se presentan en (38):

$$\begin{aligned} u_{d,PI} &= R_a i_d + L_s \frac{di_d}{dt} \\ u_{q,PI} &= R_a i_q + L_s \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (38)$$

De aquí se deduce llega a (39), la cual es la función de transferencia para el VSC:

$$h(s)_{dq} = \frac{1}{R_a + sL_s} = \frac{1}{R_a} * \frac{1}{1 + sT_1} \quad (39)$$

Donde,

$$T_1 = \frac{L_s}{R_a}$$

Finalmente, se logra reducir un modelo de múltiples entradas múltiples salidas (*MIMO*) a un sistema de una sola entrada una sola salida (*SISO*), el cual genera las tensiones de referencia adecuadas para el control, el cual se presentan en (40)

$$\begin{aligned} Vt_d^* &= u_{d,PI} - W L_s i_q + V_d \\ Vt_q^* &= u_{q,PI} + W L_s i_d + V_q \end{aligned} \quad (40)$$

El esquema de control interno de corrientes con referencia a (40) se muestra en la figura 12.

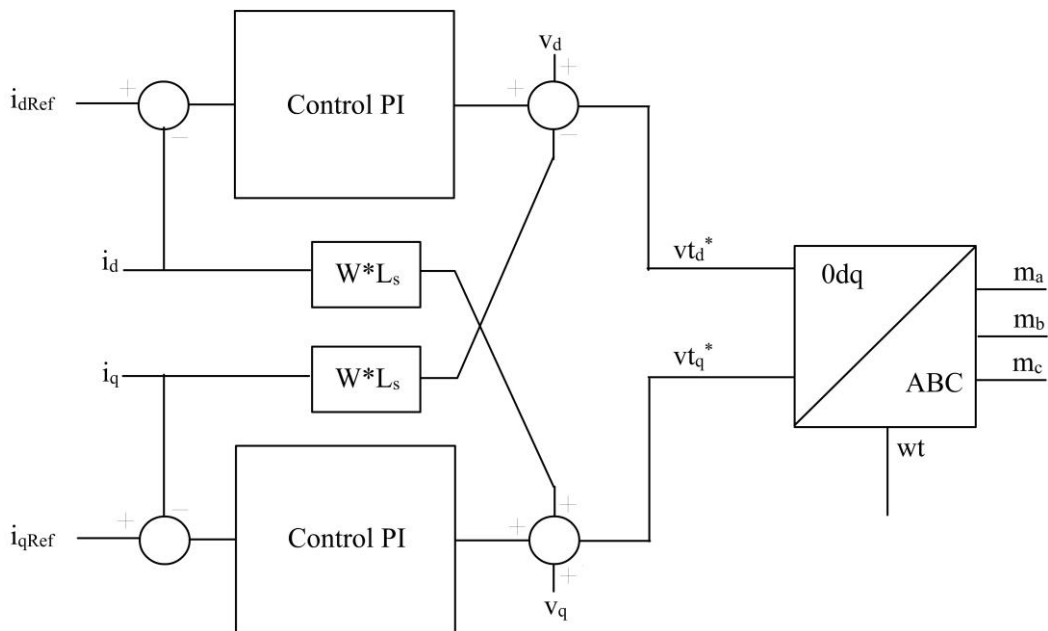


Figura 12. Esquema del control interno de corrientes.

Para el esquema anterior, la función de transferencia en lazo abierto toma la siguiente forma de (41):

$$h(s)_{OL,dq} = \frac{i(s)_{dq}}{u(s)_{dq,PI}} = k_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} * \frac{1}{R_a} * \frac{1}{1 + sT_1} \quad (41)$$

3.4 Implementación estación de carga rápida para vehículos eléctricos basada en VSC

La figura 13 muestra la estructura básica de una estación de carga rápida para vehículos eléctricos conectada con la red AC por medio de un VSC. Como se había mencionado, una estación de carga rápida está conformada por dos tipos de convertidores: un convertidor VSC trifásico de dos niveles y un grupo de convertidores DC, los cuales desempeñan el papel de ser los cargadores individuales de las baterías de los vehículos eléctricos.

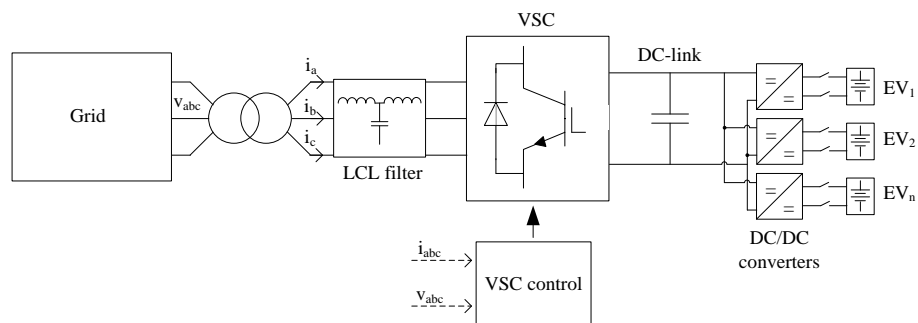


Figura 13. Esquema de estación de carga rápida para vehículos eléctricos.

Para la implementación de la estación de carga rápida en el entorno de simulación de Simulink, se requiere tanto del PLL, como del esquema de control de corrientes descrito con anterioridad. Adicionalmente, se hace control sobre la tensión del *DC-link*, con la cual se estima la corriente de eje directo que ingresa como señal de referencia al control de corriente. El esquema de la estación de carga implementada en el sistema de prueba IEEE de 13 nodos [63], así como los bloques de control del *inner loop* y del *outer loop* (control de la tensión del *DC-link*), se muestran en las figuras 14, 15 y 16 respectivamente.

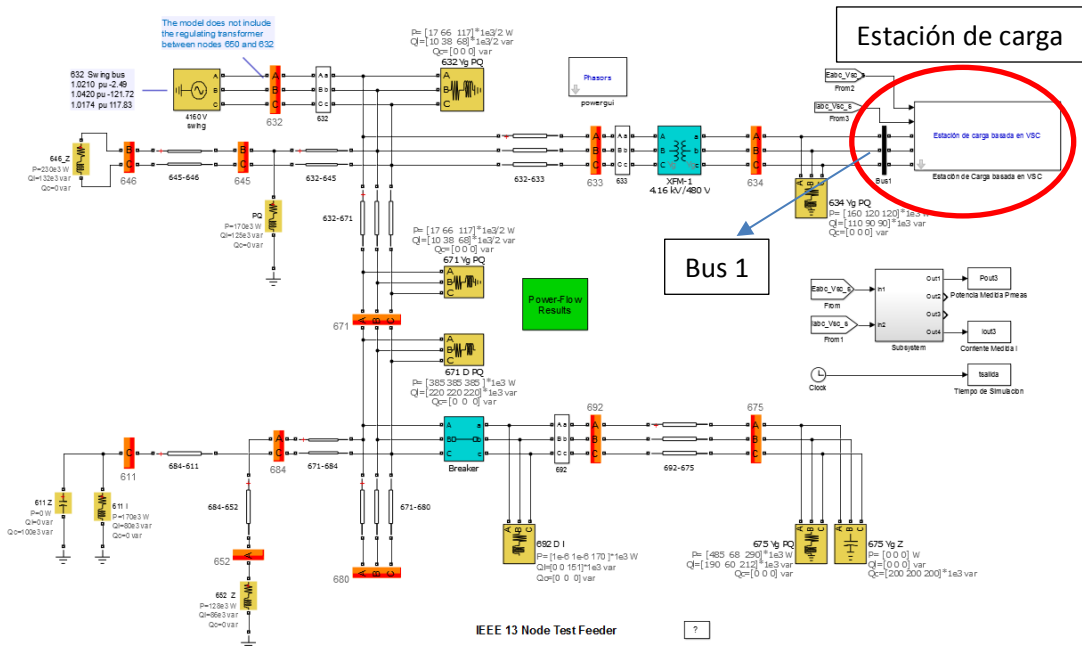


Figura 14. Estación de carga rápida implementada para vehículos eléctricos en sistema IEEE de 13 nodos.

En la figura 14 se resalta con una circunferencia de color rojo, que la estación de carga rápida se encuentra conectada al barraje nombrado como Bus1. El sistema de prueba IEEE de 13 nodos, es un circuito de distribución de tamaño pequeño y con cargabilidad relativamente alta [63]. Sin embargo, debido a su alta empleabilidad en diferentes estudios en sistemas de distribución, es un escenario de prueba que está en conformidad con los requerimientos de la estación de carga propuesta.

El control interno de corrientes implementado en la figura 15, obedece al control que se dedujo para el esquema del VSC con frecuencia impuesta por la red y que se presentó en la figura 10.

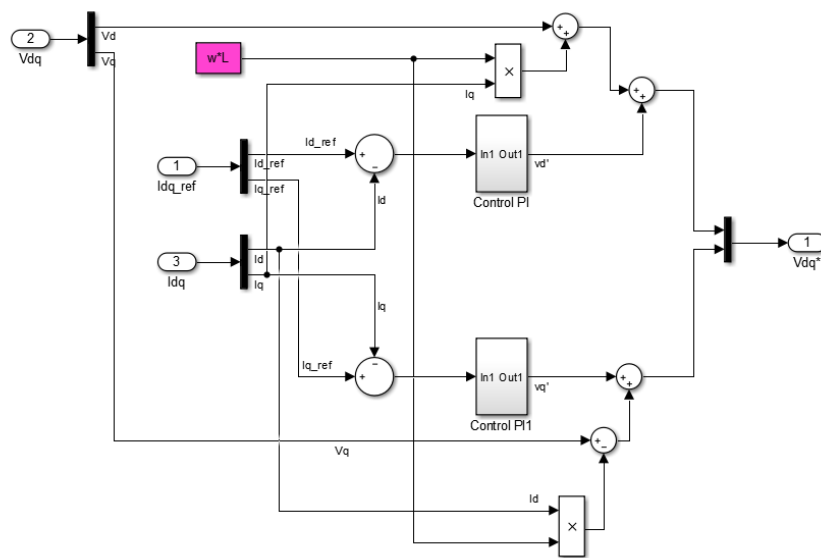


Figura 15. Control interno de corrientes implementado.

Al igual que para el caso del *inner loop*, el *outer loop* corresponde a un control PI, el cual tiene función de asegurar que la tensión en el capacitor se mantenga un valor de referencia constante.

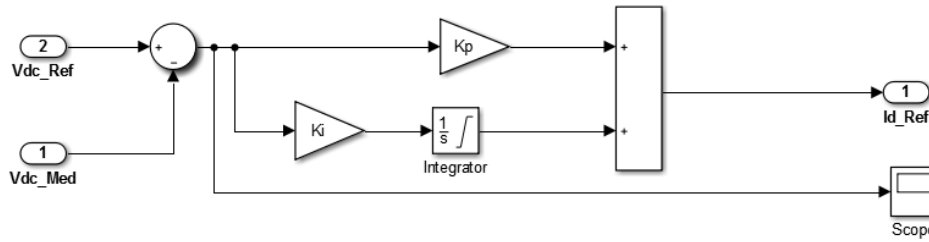


Figura 16. Control externo de tensión en *DC-link*.

Debido a que el sistema de control PLL, se emplea tanto para la implementación de la estación de carga, como para la del sistema SMES, el esquema del PLL desarrollado se muestra en el numeral del SMES.

Finalmente, se puede notar que la entrada I_{d_ref} de la figura 15, se obtiene de la salida de control de la tensión del *DC-link* (*outer-loop*), de la figura 16.

3.5 Implementación sistema SMES basado en VSC

En la figura 17 se presenta la estructura típica de un sistema SMES, el cual está conectado a la red AC, al igual que la estación de carga rápida, a través de un VSC. Adicionalmente al VSC, el sistema SMES puede considerarse un convertidor DC o DC-chopper, que es básicamente un convertidor básico conmutado, también conocido como troceador de continua [64]. Para este caso, el modelo dinámico de este tipo SMES, está dado por la dinámica tanto del VSC como del DC-chopper.

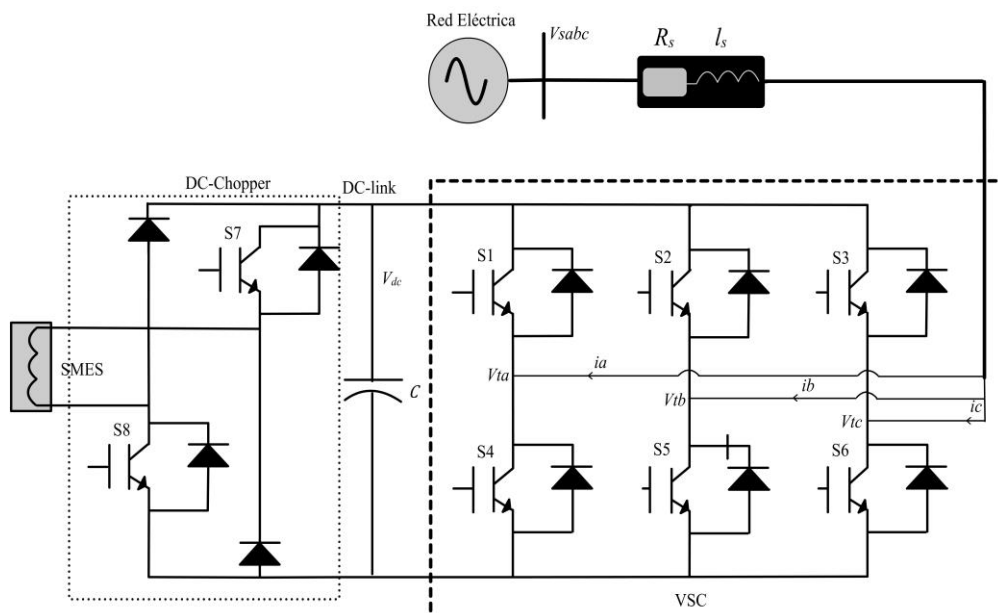


Figura 17. Esquema sistema de almacenamiento SMES.

Los voltajes en terminales del VSC, en equivalente dq , notados como V_{td} y V_{tq} se pueden reescribir en términos de los índices de modulación del VSC m_d y m_q . De manera similar, la relación de voltajes en el SMES se expresa en términos de la corriente almacenada por la bobina súper conductora i_s y del índice de modulación del DC-Chopper m_s .

$$\begin{aligned}
 V_{dc}m_d &= R_a i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega L_s i_q + V_d \\
 V_{dc}m_q &= R_a i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega L_s i_d + V_q \\
 \frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{m_s i_s}{C} - \frac{m_d i_d}{C} - \frac{m_q i_q}{C} \\
 \frac{di_s}{dt} &= -\frac{m_s v_{dc}}{L_s}
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

Como se observa de la figura 18, el PLL tiene como entrada los voltajes y corrientes en referencia ABC, tomados directamente del barraje del convertidor VSC. Luego de aplicar el control del lazo con retroalimentación mostrado en la figura 11, se obtienen las señales E_d, E_q, I_d e I_q , en el marco de referencia dq , y en el marco SRF , lo cual garantiza el correcto funcionamiento de los demás controles.

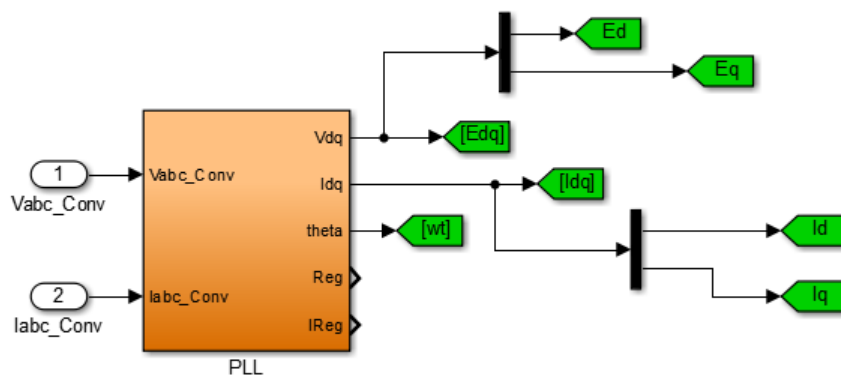


Figura 18. PLL del sistema SMES.

En la figura 19 se muestra un esquema general del control del SMES adaptado para actuar en la mitigación de oscilaciones en la frecuencia de la red.

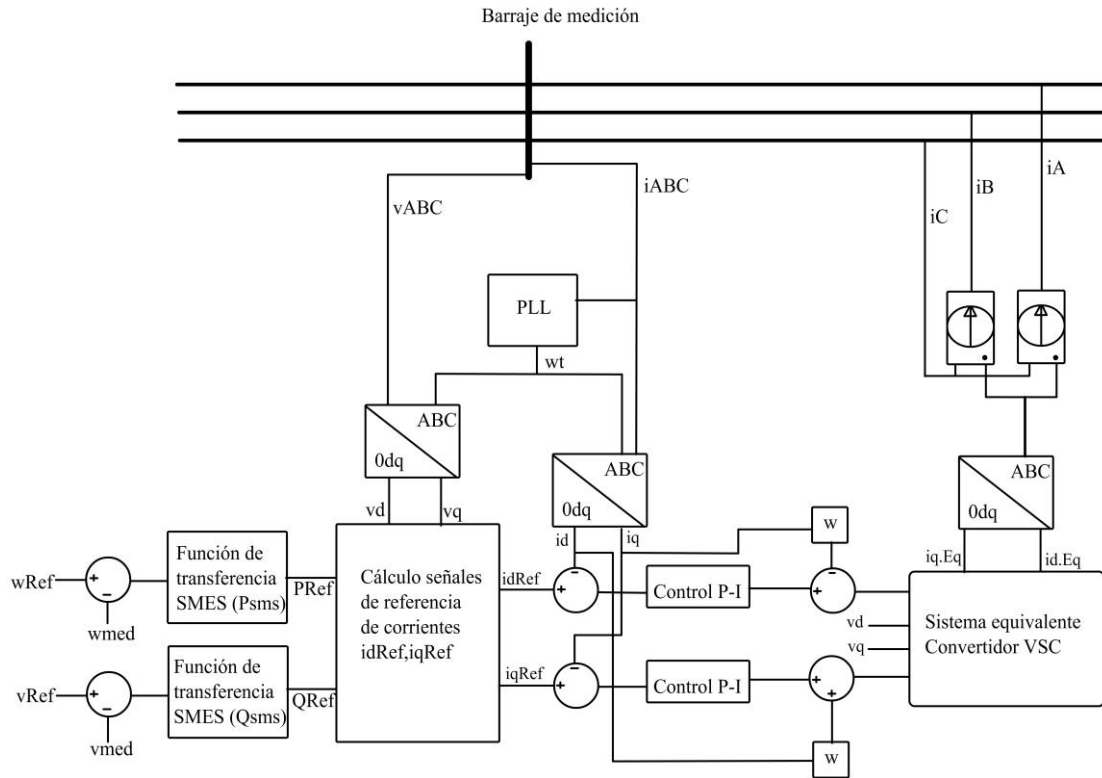


Figura 19. Esquema de control del SMES.

En este caso, los controles P-I actúan de manera similar que en la estación de carga para vehículos, haciendo las veces del control interno de corrientes. Sin embargo, para el control externo, el control ya no se efectúa sobre la tensión del capacitor de soporte, sino en la velocidad de giro del rotor.

Por tal motivo, se emplea la función de transferencia mostrada en la figura 20, en la cual ante una perturbación en la demanda de potencia del sistema, se produce una variación en la velocidad de giro de la máquina ∇w , dicha perturbación ingresa a la función de transferencia, donde se genera una salida ∇P_{sm} . La cual es proporcional a la señal de referencia I_{d_ref} , y por lo tanto, se puede ingresar al *inner loop*, como en el caso de la estación de carga. Las constantes k_{vs} y T_{dc} corresponden a la ganancia de amplificación y al tiempo de retraso del convertidor, respectivamente.

La inductancia del filtro de entrada al convertidor, así como la corriente inicial con la que se encuentra cargado el SMES, se representa por medio de L e I_{sm0} , respectivamente.

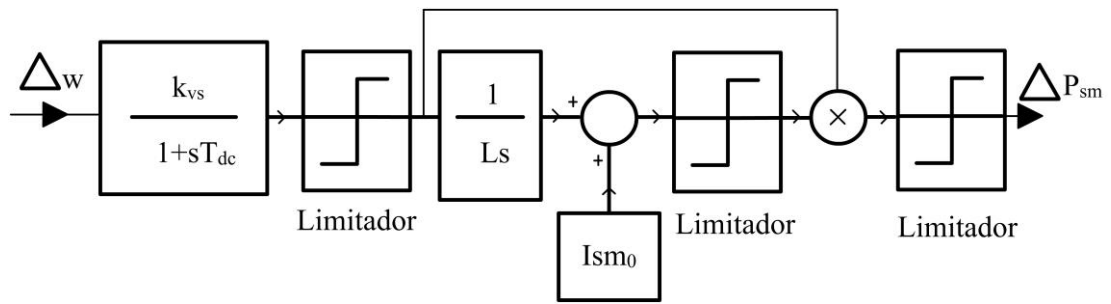


Figura 20. Esquema función de transferencia respuesta SMES.

El esquema general de control mostrado en la figura 19, se implementa en el paquete de simulación simulink, con el propósito de obtener los registros operativos del SMES. Un gráfico de dicho montaje se presenta en la figura 21 y 22.

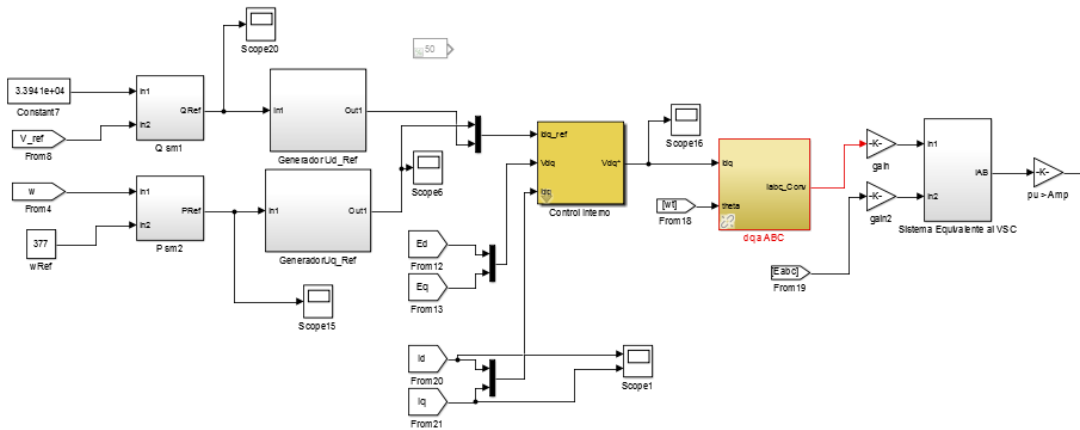


Figura 21. Esquema de control del sistema SMES implementado en simulink.

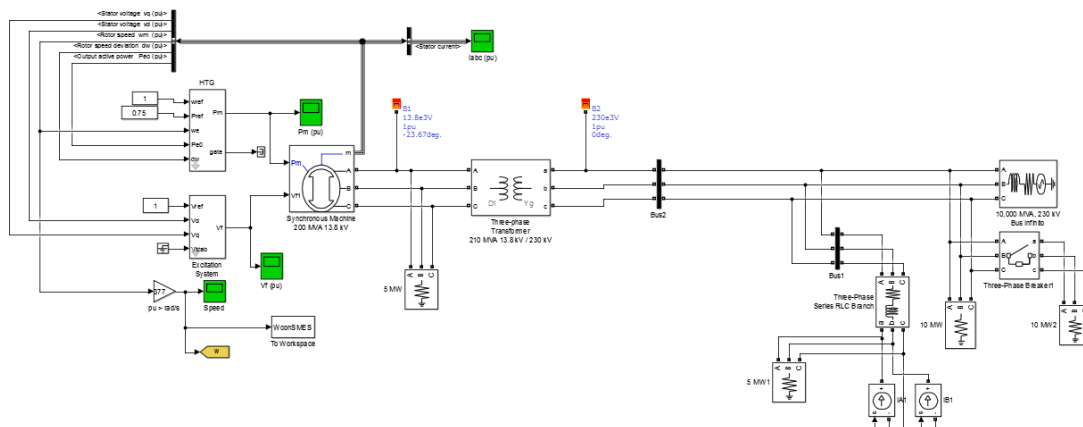


Figura 22. Sistema implementado de maquina síncrona-SMES implementado en simulink.

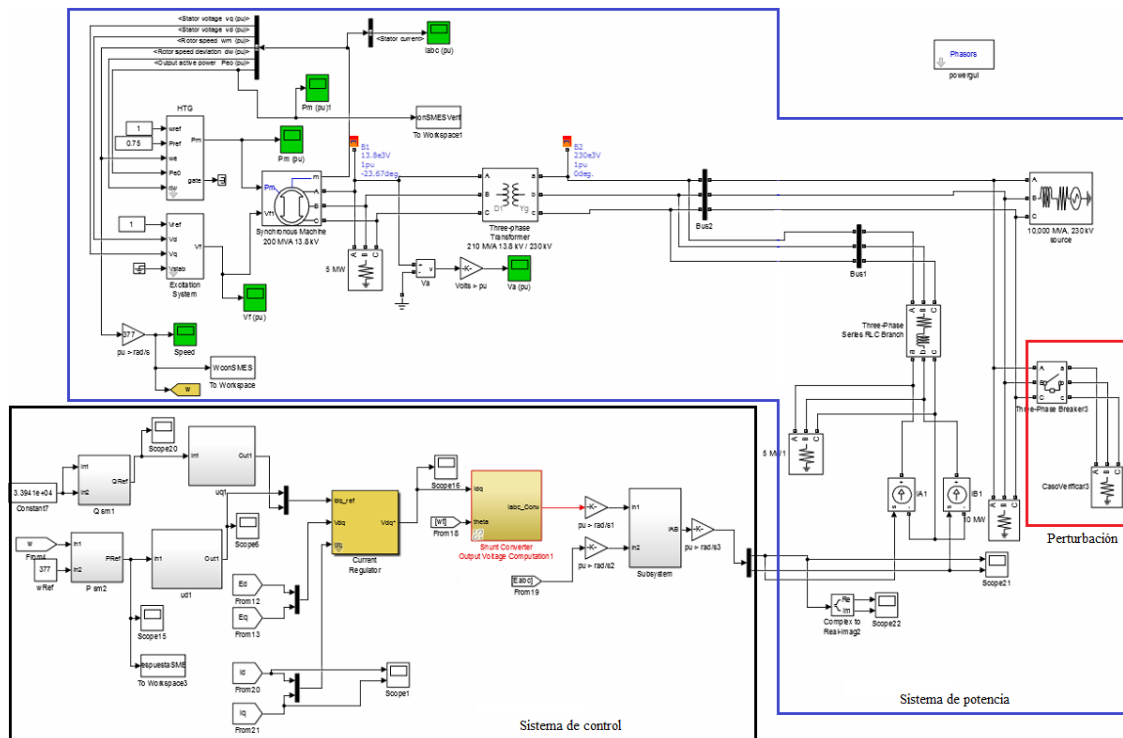


Figura 23. Sistema completo de maquina síncrona-SMES implementado en simulink.

En la figura 23 se aprecia la implementación del sistema máquina síncrona con barraje infinito y SMES, en donde se señalan los sistemas de control y potencia del sistema completo. El sistema de control está compuesto por los controladores de potencia activa y reactiva, los cuales se encargan de generar las señales de referencia de entrada al regulador de corriente, por su parte, el regulador de corriente realiza el control del voltaje del modelo promediado del VSC. Seguidamente, las señales controladas a la salida del VSC promediado se conectan a las fuentes controladas corriente del sistema de potencia. El sistema de potencia está compuesto tanto por una máquina síncrona con sus respectivos controles sobre la excitación y el gobernador, como por las fuentes controladas de corriente, las cuales representa las inyecciones de potencia realizadas por el SMES.

Finalmente, en la figura 23 también se muestra un recuadro identificado como perturbación, el cual consiste en un interruptor trifásico y una gran que se ingresa y se retira de la red, con el propósito de generar perturbaciones en la potencia del sistema, para provocar el accionamiento del SMES.

4

Metodología para la estimación y selección de modelos de carga

Debido a que existen diferentes tipos de tecnologías y prototipos empleados para los vehículos eléctricos, estos pueden presentar alta variabilidad en sus consumos, debido al comportamiento aleatorio de los conductores y a la dificultad para determinar el *SoC* de las baterías con el cual los vehículos inician el proceso de recarga en la estación de carga. Estos elementos generan gran cantidad de condiciones operativas en la estación, por lo tanto, es posible obtener distintos perfiles de carga. De manera similar, el sistema SMES puede presentar diferentes estados operativos, dependiendo del tipo de contingencia o escenario de carga presente en la red a la que se encuentra conectado.

De acuerdo con lo anterior, se han propuesto diferentes modelos que intentan aproximar el comportamiento tanto del vehículo eléctrico (o estación de carga rápida), como del SMES ante diferentes escenarios operativos. Por tal motivo, este capítulo está orientado a establecer una estrategia iterativa que permita identificar los modelos que mejor se ajusten a condiciones operativas típicas para la estación de carga rápida implementada y de un SMES conectado a un sistema de máquina síncrona y barraje infinito. La parametrización de los modelos se realiza por medio de las etapas de estimación de parámetros y validación de modelos, específicamente por medio de la evaluación de indicadores de error propuestos.

Cabe resaltar que la metodología aquí planteada es general e independiente de la naturaleza del modelo empleado. Por ejemplo, en esta tesis, la estrategia metodológica se aplicó tanto para los diferentes modelos de carga estáticos propuestos en la literatura para representar el comportamiento de los vehículos eléctricos, así como para el modelo dinámico en forma de función de transferencia, empleado para representar el SMES.

4.1 Estrategia general aplicada a estación de carga de vehículos eléctricos

La estrategia general para la estimación y selección de modelos de carga para la estación de carga de vehículos eléctricos consta fundamentalmente de tres etapas principales denominadas: selección de modelos y perfiles de carga, estimación de parámetros de los modelos de carga y

evaluación del desempeño de los modelos. Dicha estrategia se muestra en la figura 24, donde se observa que la etapa 1 se encarga de iniciar el proceso mediante la selección de los modelos de carga para los vehículos y de los perfiles de carga producto de la operación de la estación de carga. Posteriormente, la etapa 2 está orientada a determinar los parámetros de los modelos de carga propuestos para los vehículos eléctricos, gracias a la evolución iterativa del algoritmo de optimización implementado, hasta que se determina un error de estimación mínimo. Finalmente, en la etapa 3 se efectúa la evaluación del desempeño de los modelos estimados, pero ante condiciones diferentes a las empleadas para la estimación de la etapa 2, en este caso se hace uso de los errores de validación cruzada y de validación total, para establecer los modelos de mayor capacidad de generalización. Dichos modelos, con sus respectivos parámetros y errores estimados, son la salida de la propuesta metodológica presentada en la presente tesis.

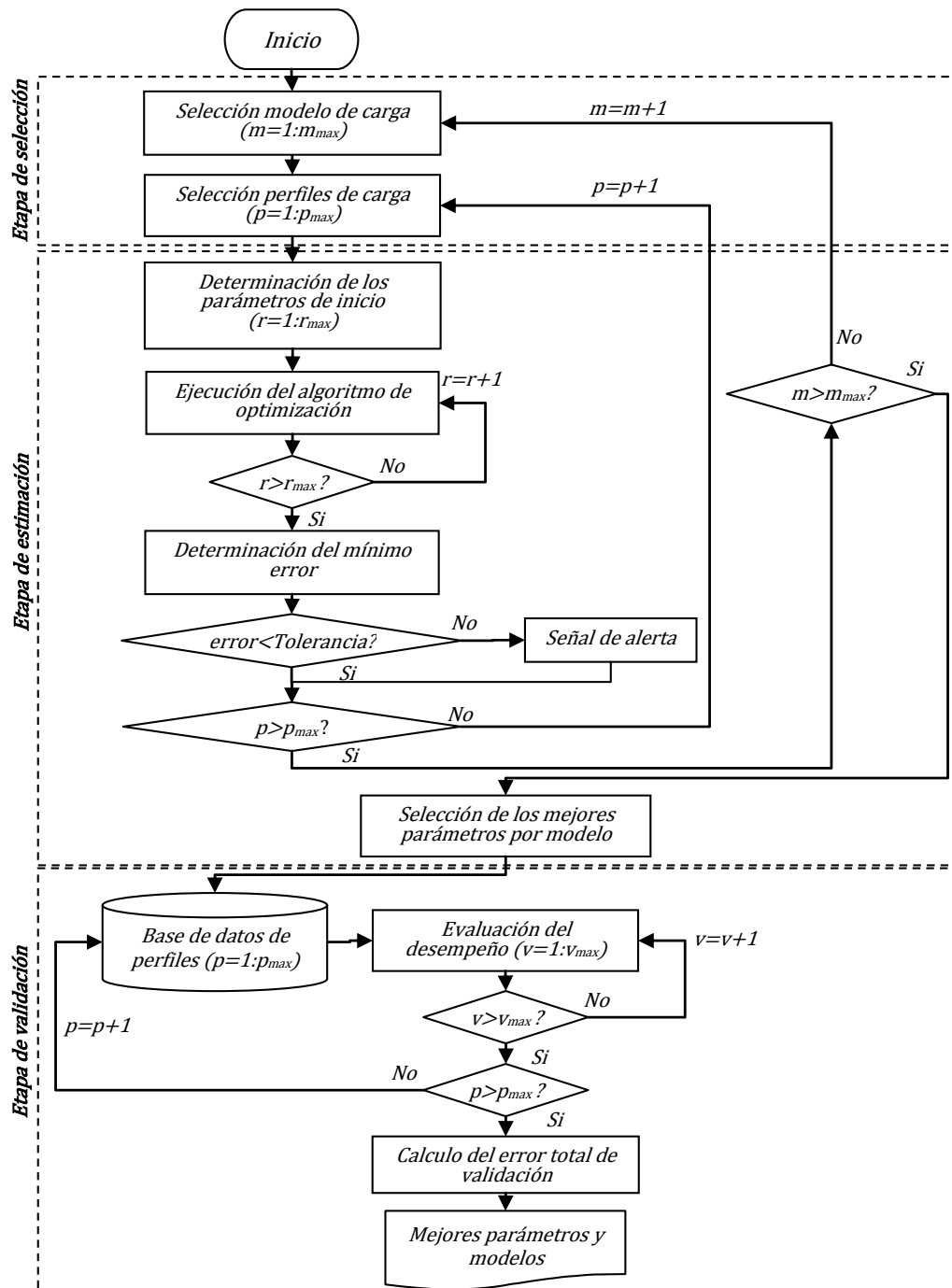


Figura 24. Esquema general de la metodología propuesta.

4.1.1 Etapa 1. Selección de modelos y perfiles de carga

Esta etapa se centra tanto en la selección de las estructuras de modelos predefinidos de acuerdo a criterios pertinencia y/o facilidad de implementación, así como los perfiles de carga de la operación de la estación de carga de los vehículos eléctricos.

La etapa está dividida en dos tareas:

A. Paso 1.1 Selección de los modelos de carga de la operación de la estación

Los modelos de carga de la estación, corresponden a las expresiones matemáticas que relacionan una variación en las variables eléctricas del barraje del convertidor, ante la conexión y desconexión de los vehículos, con las demandas de la potencia en la estación. Debido a que el objetivo de esta tesis es estudiar el comportamiento de los vehículos eléctricos cuando se encuentran conectados a la red, es decir en periodos de estado estable, los transitorios electromagnéticos no son de interés y por lo tanto, todos los modelos de los vehículos eléctricos analizados son del tipo estáticos. Dichos modelos, se formulan según previa revisión bibliográfica sobre las estructuras típicas para el vehículo eléctrico. Por lo tanto, en este punto se contempla la relación existente entre la potencia activa de los vehículos eléctricos, con factores como el estado de carga de las baterías *SoC*, las características del sistema de potencia al que se conectan las cargas (sistema fuerte o débil), o la estrategia de control empleada para el VSC.

Para la aplicación de la metodología de estimación, los modelos de carga seleccionados para la estación de carga se numeran con la variable m en la figura 24. De esta forma, se garantiza que los m_{max} modelos de carga propuestos ingresen iterativamente a la etapa de estimación de parámetros.

Como se mencionó en el capítulo 2, las estructuras de modelos mostradas en (20) y (22) son empleadas por [1][45] y [65] para representar un modelo del vehículo eléctrico en función de tensión, ya que su formulación está orientada en evaluar el impacto que tiene una carga del tipo vehículo eléctrico en la estabilidad del sistema. En este sentido, los sistemas de prueba que emplean los autores de los estudios antes citados, ofrecen redes susceptibles a perturbaciones, además se consideran flotas relativamente grandes de vehículos eléctricos (del orden de los cientos [66]), por lo que se ve altamente afectada la estabilidad en tensión de la red. Por su parte, en [67] se estudia la caída de tensión que se puede presentar en una red de distribución ante la conexión de varios vehículos eléctricos, allí se encontró que para las estaciones asociadas a redes fuertes las variaciones en tensión no son significativas, incluso ante el peor escenario posible, es decir, la conexión simultánea de la totalidad de flota de vehículos admisibles por la estación, 8 para el caso citado.

Como elemento diferenciador frente a las referencias mencionadas, esta tesis analiza la conexión de hasta cinco vehículos eléctricos, en un esquema de conexión no simultánea de los mismos, y al considerar una red fuerte. Adicionalmente, y de acuerdo a las simulaciones realizadas en un sistema de prueba IEEE de 13 barras, se pudo evidenciar que las variaciones en tensión producto de la operación de la estación de carga no fueron relevantes, comparadas con la alteración que se presenta en las corrientes en el barraje del convertidor. Esto se puede explicar debido al hecho de que el esquema de control implementado sobre el VSC, emplea dichas corrientes como señales de referencia, y debido a la presencia del PLL, estas corrientes son proporcionales a la potencia de entrada necesaria para mantener la tensión en el *DC-link* en un valor constante. De acuerdo a lo anterior, los modelos seleccionados de la revisión bibliográfica realizada, se plantearon como funciones de las corrientes de línea en el barraje del convertidor, con el objetivo de reproducir un comportamiento característico de la carga analizada.

En (43) a (46), se presentan los modelos de carga para la estación de carga rápida de vehículos eléctricos empleados como caso de estudio por la metodología aquí descrita.

➤ **Modelo modificado potencia del tipo constante más exponencial (P+Exp)**

En este caso, se plantea un modelo de característica exponencial, más una componente de potencia constante, según propuestas descritas en el estado del arte por [45], [65]. Los parámetros a estimar son: k_{cp} , k_{vd} y α , como se muestra en (43)

$$P/P_0 = k_{cp} + k_{vd}(i/i_0)^\alpha \quad (43)$$

Donde P_0 e i_0 corresponden a la potencia y corriente nominal respectivamente.

➤ **Modelo modificado del tipo lineal más exponencial (L+Exp)**

De manera análoga al caso anterior, nuevamente se propone una componente exponencial, y se adiciona un término linealmente dependiente a la corriente de línea. Los parámetros estimados son k_1 , k_2 y α , según se presenta en (44)

$$P/P_0 = k_1(i/i_0) + k_2(i/i_0)^\alpha \quad (44)$$

➤ **Modelo polinomial modificado del tipo (ZIP)**

Debido a la alta aplicabilidad de esta estructura, se relaciona el modelo ZIP descrito en términos de la corriente con la potencia demandada por la estación de carga de vehículos eléctricos. Se puede notar una componente de dependencia cuadrática con la corriente C_1 , de dependencia lineal a la corriente C_2 y de potencia constante C_3 , como se aprecia en (45)

$$P/P_0 = C_1(i/i_0)^2 + C_2(i/i_0) + C_3 \quad (45)$$

➤ **Modelo modificado del tipo exponencial (EXP)**

Finalmente, del modelo L+EXP, se desprecia el término lineal, para obtener una forma totalmente exponencial para representar cierto tipo de cargas especiales, analizadas en detalle en [11]. Los dos parámetros a estimar son k_1 y np , como se ve en (46)

$$P/P_0 = k_1(i/i_0)^{np} \quad (46)$$

B. Paso 1.2 Selección de los perfiles de carga de la estación

Adicional a la selección de los modelos de carga, en la etapa 1 se definen los perfiles de carga empleados como insumos para la etapa 2.

Los perfiles de carga, son los registros de las variaciones de potencia activa y corriente, obtenidas de la operación de la estación de carga. Dichos perfiles se numeran en el esquema de la figura 24 con la variable contadora p . Donde se observa que para cada modelo de carga

seleccionado m , se deben evaluar todos los p_{max} perfiles de carga, antes de continuar con la selección del próximo modelo de carga.

En la figura 25 se muestra un perfil de potencia activa, donde se presenta la conexión y desconexión de 5 vehículos eléctricos. Dicha operación se da en un rango de operación entre las 18 y las 22 horas.

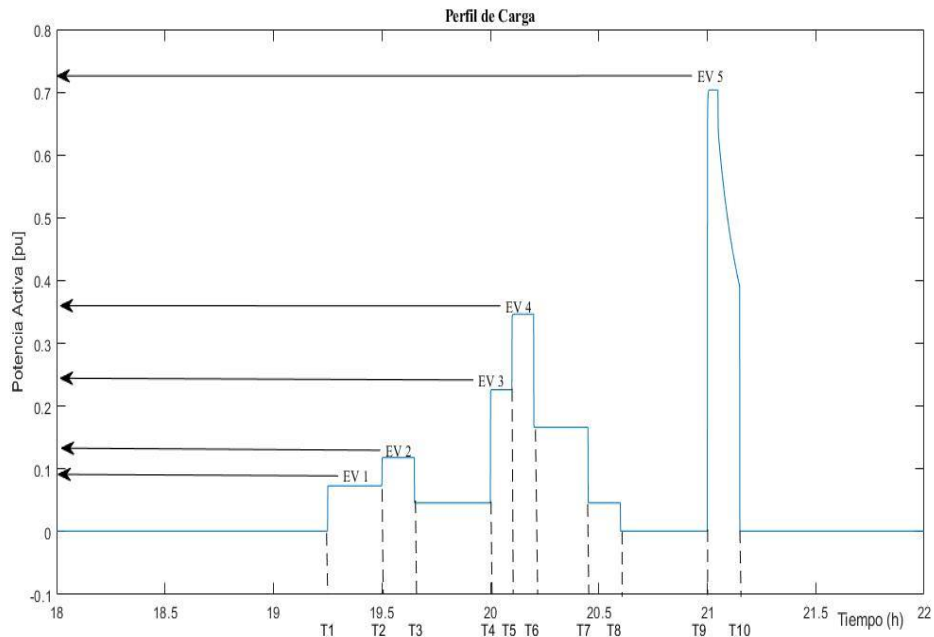


Figura 25. Ejemplo de un perfil de consumos de potencia activa de la estación de carga rápida para vehículos eléctricos.

El primer vehículo, notado como EV1, hace su arribo y conexión a la estación a las 19.25 horas, dicho vehículo presenta una característica de consumo correspondiente a un cargador cuyo algoritmo de carga es del tipo *CCCV* [44], según como se explicó en el capítulo dos. Adicionalmente, de acuerdo al valor de su demanda máxima, se puede afirmar que es un vehículo de carga rápida DC de nivel 1. Posteriormente, a las 19.5 horas, se presenta el arribo y conexión del vehículo eléctrico EV2, el cual también presenta una carga del tipo *CCCV* y nivel 1 de carga DC, sin embargo, se evidencia que el vehículo EV2 arriba con un *SoC* menor que el del vehículo EV1, ya que EV1 abandona la estación a las 19.7 horas, mientras que EV2 lo hace a las 20.7, debido a que se considera que la condición para un vehículo se desconecte es que ha alcanzado su nivel de carga máxima. Por su parte, entre las 20 y las 20.5 horas, se presenta la conexión y desconexión de los vehículos EV3 y EV4, ambos con tipo de carga *CVCC* y del nivel 3, y de *SoC* muy similar. Finalmente, a las 21 horas se presenta la conexión del vehículo EV5, el cual es de la tecnología tipo Tesla, lo cual se puede notar debido al decaimiento exponencial en la curva de potencia, cuando la batería alcanza su valor de carga máxima.

En términos generales, se recomienda que el vehículo tipo Tesla realice su recarga en solitario (ingresa a las 21 y se desconecta a las 21.18), por lo que todos los perfiles aquí propuestos, solo permiten las conexiones simultáneas de los vehículos con protocolos de consumo *CCCV*, y de niveles de carga rápida DC 1,2 y 3. La operación de la estación aquí descrita, considera tanto el

SoC inicial de los vehículos, como la hora de arribo y el tiempo de duración de la recarga con valores aleatorios, sin embargo, estos se pueden modelar por medio de distribuciones probabilísticas y haciendo uso de la teoría de procesos estocásticos, como se detalla en la clasificación realizada en la elaboración del estado del arte de esta tesis definida como modelado del vehículo basado en la incertidumbre de variables presentada con anterioridad. En la tabla 2, se presentan los movimientos realizados durante la operación de la estación de carga, para el perfil de carga analizado.

Tabla 2. Movimientos en la operación de estación para el perfil de carga anterior

Tiempo	Acción
T1	Conexión EV1
T2	Conexión EV2
T3	Desconexión EV1
T4	Conexión EV3
T5	Conexión EV4
T6	Desconexión EV3
T7	Desconexión EV4
T8	Desconexión EV2
T9	Conexión EV5
T10	Desconexión EV5

4.1.2 Etapa 2. Estimación de parámetros de los modelos de carga de la estación

En esta etapa se utilizan las selecciones de la etapa 1 para obtener los modelos parametrizados de los vehículos eléctricos. De la etapa anterior, se ha seleccionado tanto una estructura de modelo, como el perfil de carga que se desea representar. Para este instante, los parámetros que conforman la estructura de modelo son desconocidos. Al efectuar los cuatro pasos que se describen a continuación, se consigue determinar un conjunto de parámetros mediante la minimización de la diferencia entre la respuesta del modelo de carga para el vehículo parametrizado y las mediciones en potencia tomadas del barraje de la estación.

A. Paso 2.1 Determinación de los parámetros de inicio

Para la obtención de un modelo de carga basado en mediciones se emplea el método de estimación que utiliza un algoritmo de optimización para minimizar la desviación existente entre la señal medida y la estimada.

Como se ha mencionado para esta tesis, el algoritmo de optimización empleado para la estimación de los parámetros de un modelo de carga de la estación para la recarga de vehículos eléctricos, es la metaheurística de búsqueda tabú. Esta técnica emplea un mecanismo de exploración basado en la creación de vecindarios. Un vecindario, es un conjunto de vecinos que se crea a partir de un vecino inicial, por medio de variaciones elementales del mismo. Para este caso particular de la aplicación desarrollada en esta tesis, un vecino es el conjunto de los parámetros de cada uno de los modelos de carga propuestos. Dichos vecinos están dispuestos en una estructura tipo vector para la cual, dependiendo del modelo de carga analizado, se tienen vecinos de dos componentes (duplas) o de tres componentes (ternas).

Luego de evaluar cada uno de los vecinos, se selecciona y almacena aquel con el menor valor de la función incógnita (vecino de calidad). Dicho esquema de búsqueda termina por crear rutas o trayectorias de exploración, que pueden iniciar desde un punto solución o vecino arbitrario, y finalizar en vecinos de calidad.

El esquema de búsqueda antes mencionado, es propio de las técnicas basadas en trayectorias, y es muy atractivo en la búsqueda de parámetros de modelos de carga, ya que se logra disponer de sensibilidad sobre los parámetros estimados. Por ejemplo, un conjunto de parámetros puede arrojar un valor de la función incumbente deseable, sin embargo, los valores de dichos parámetros pueden estar por fuera de los rangos lógicos para las estructuras de los modelos de carga. Por su parte, las técnicas poblacionales (basadas en poblaciones) hacen uso de un conjunto muy amplio de soluciones (poblaciones), las cuales son optimizadas simultáneamente durante la búsqueda. Esta característica ofrece normalmente, soluciones de calidad, pero que pueden estar alejadas de los rangos deseables o típicos para las estructuras de modelos analizados. De esta forma, la aplicación del *TS* puede establecer valores que limiten las magnitudes de los parámetros de los modelos de carga, con el propósito de encontrar vecindarios factibles tanto para la función objetivo, como para la aplicación práctica de los resultados de la búsqueda.

Según lo antes expuesto, los vecinos iniciales se pueden escoger de forma aleatoria o probabilística. No obstante, esto no garantiza que la convergencia del método sea lo suficientemente rápida, debido a que se puede estar iniciando en regiones de baja calidad, por lo que las soluciones resultantes son poco satisfactorias. En este sentido, es recomendable hacer uso de técnicas de muestreo del espacio solución, que permitan implementar un esquema básico del algoritmo tabú, donde adicionalmente, se puedan explorar diferentes rutas de búsqueda, para reducir significativamente el costo computacional de la búsqueda. Este hecho es de gran importancia, debido a que el enfoque de estimación basado en mediciones presenta desafíos en cuanto a la gran cantidad de información que maneja (bases de datos muy densas y un elevado número de parámetros por estimar), lo que aumenta el esfuerzo computacional requerido para la estimación.

De acuerdo a estos argumentos, se plantea una estrategia de muestreo que garantice unas distribuciones uniformes de los vecinos iniciales para las rutas de búsqueda, notadas con la variable contadora r en la figura 24, a lo largo del espacio solución. La técnica de muestreo *Latin hypercube* [68], se utiliza ampliamente para solucionar este tipo de problemas, además ayuda a disminuir el número de datos necesarios para representar un espacio de solución, lo que garantiza mejores rendimientos en términos del recurso computacional, ya que la dimensión del mismo se define por el número de parámetros a estimar (cada dupla o terna de parámetros, corresponden a un vecino, y este a su vez es un punto del espacio solución).

A manera de ejemplo, en las figuras 26 y 27 se presenta la comparación en la distribución de algunos datos en un espacio solución particular, al emplear la técnica *latin hypercube*, y una distribución totalmente aleatoria. En la figura 26, el muestreo se realiza mediante la estrategia de muestreo *latin hypercube*, aquí se puede notar que la distribución de los datos se hace de manera uniforme, y no se presenta aglutinamiento de datos en zonas relativamente cercas. Por su parte, en la figura 27 se realiza una distribución aleatoria de los datos, en el cual, a diferencia del caso anterior, se puede observar el aglutinamiento de los datos en zonas cercanas del espacio de solución propuesto.

El aglutinamiento observado, implica que los vecinos o configuraciones iniciales pueden presentar características muy similares, por lo que existe alta probabilidad de que se converja a soluciones que correspondan a óptimos locales, debido a que no se está garantizando diversidad en las rutas de búsqueda del algoritmo.

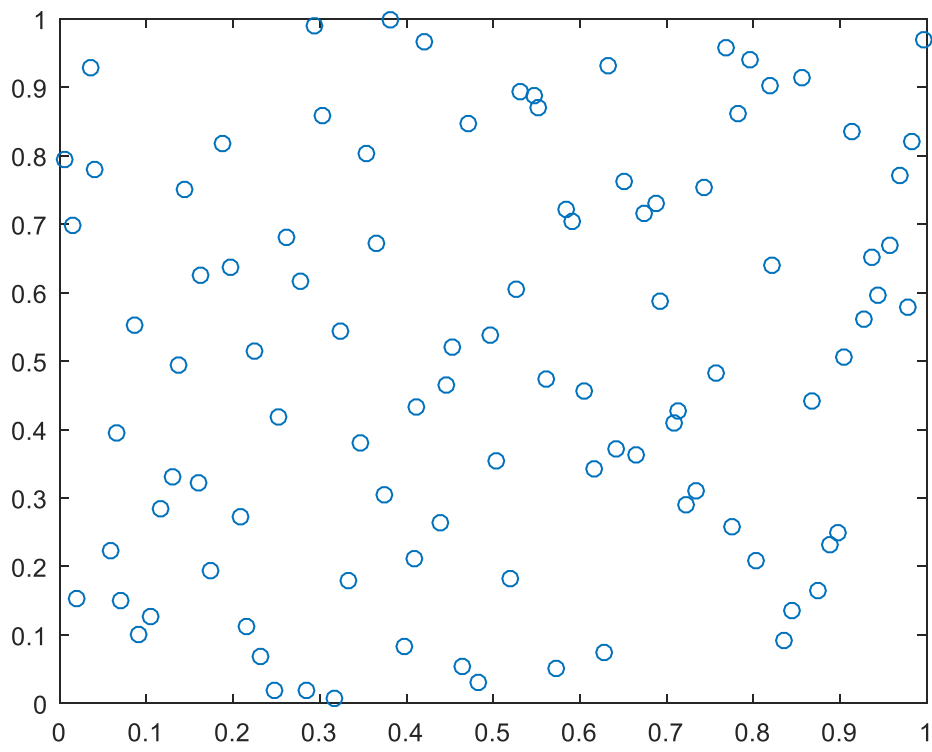


Figura 26. Muestreo empleando la técnica de *Latin hypercube*.

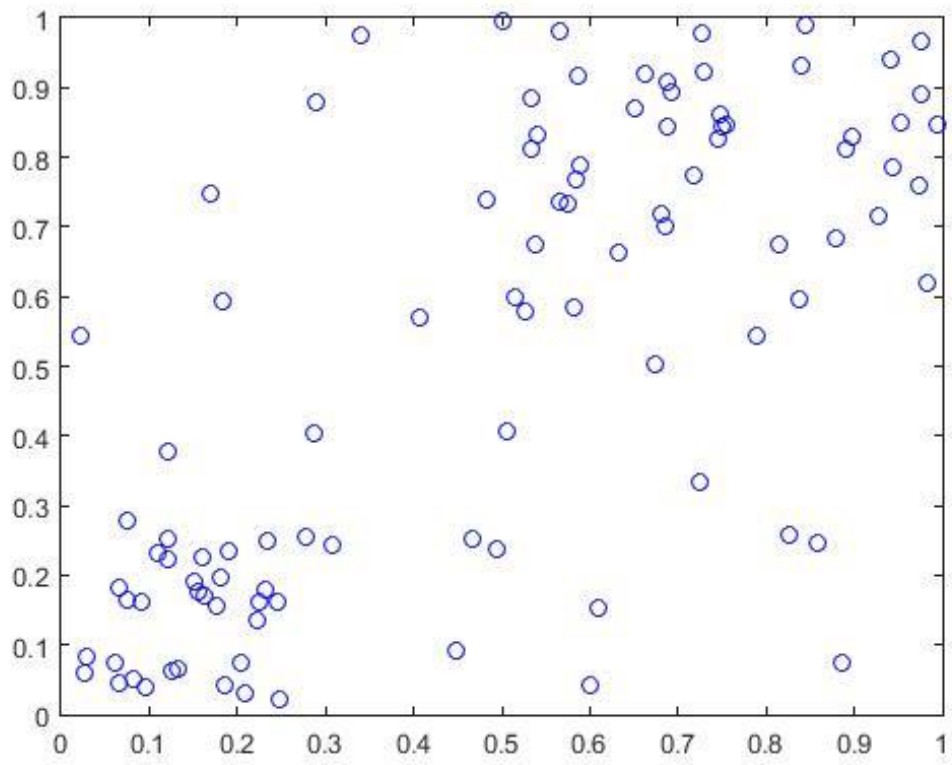


Figura 27. Muestreo empleando distribución totalmente aleatoria.

B. Paso 2.2 Ejecución del algoritmo de optimización aplicado a la estrategia de estimación basada en mediciones

Ante una variación en los consumos de la estación de carga de los vehículos eléctricos, se obtienen las mediciones de la potencia activa (P_{meas}) y la corriente inyectada en el barraje. Los registros de la corriente se evalúan en las estructuras de los modelos de carga que van a ser parametrizados y la respuesta en potencia obtenida (P_{estim}), se compara iterativamente con la señal de potencia (P_{meas}), hasta encontrar los parámetros que minimicen la desviación entre ambas señales. Esto se realiza mediante el cálculo y minimización de un error de estimación para cada modelo m , con el propósito de obtener el conjunto de parámetros **par**, que mejor reproduzcan el comportamiento de cada uno de los perfiles de carga en potencia activa p , para cada una de las muestras k . Como se muestra en (47).

$$E_{m,par,p} = \sum_{k=1}^N \frac{(P_{meas,k} - P_{estim,k})^2}{N} \quad (47)$$

Donde N es el número total de muestras en la medición, y P_{meas} y P_{estim} están dados en por unidad.

Debido a que los registros de los perfiles de carga en potencia activa, con los cuales se calculan los diferentes indicadores de error que se presentan a lo largo de la presente tesis están en por unidad, los errores estimados son adimensionales y corresponden a una medida de la variación o desviación entre el conjunto de los datos numéricos medidos y estimados.

Como se mencionó con anterioridad, una desventaja de aplicar el modelado basado en mediciones es la gran carga computacional requerida en la estimación de modelos que contienen un número elevado de parámetros. Adicionalmente, ante una gran cantidad parámetros por determinar, se pierde precisión en la metodología de estimación. Por otro lado, si se dispone de sistemas de potencia de tamaño considerable y con gran número de cargas, se debe analizar la posibilidad de aplicar técnicas basadas en sensibilidad de parámetros para aliviar los esfuerzos de cómputo que exigen este tipo de problemas [17].

Dado que el modelado de carga por medio de mediciones es un problema matemático de identificación, se presenta en la figura 28 un esquema conceptual del algoritmo para la estimación de parámetros basado en mediciones, aplicada a una estación de carga rápida para vehículos eléctricos, que permite actualizar de manera iterativa el conjunto de parámetro, hasta que se alcanza un error de estimación mínimo.

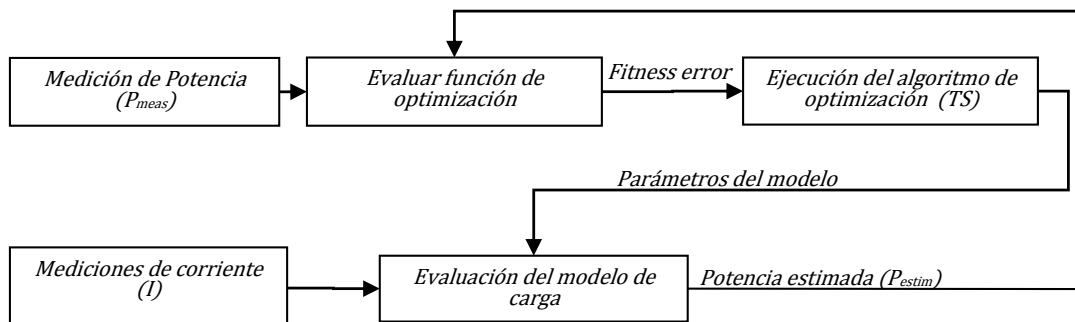


Figura 28. Estrategia de estimación de carga basada en medición aplicada a una estación de carga rápida de vehículos eléctricos.

En la figura 28, I corresponde a las mediciones de la corriente tomadas del barraje del convertidor, cuya variación ante la conexión de un vehículo, también produce una alteración en la potencia demandada por la estación de carga, la cual también está en por unidad y se captura como P_{meas} . La misma variación en la corriente se ingresa al modelo de carga, y a partir de la estimación de parámetros, se obtiene la respuesta estimada del modelo de carga de la estación de carga rápida P_{estim} . La función objetivo propuesta para la estimación de parámetros al emplear el algoritmo de optimización de búsqueda tabú, obedece a la expresión mostrada en (48).

$$\begin{aligned} \text{Función objetivo} \quad & \text{minimizar} \quad E_{m,par,p} \\ & \mathbf{par} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{par} \in \text{espacio solución} \end{aligned} \quad (48)$$

Por su parte, un esquema básico del algoritmo de búsqueda tabú, se puede expresar en la forma del diagrama de flujo que se presenta en la figura 29.

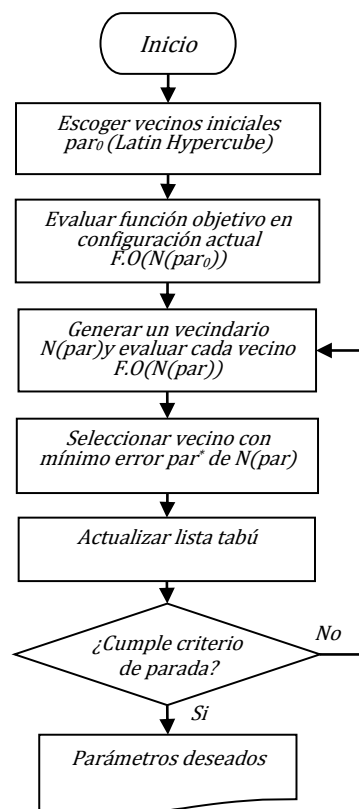


Figura 29. Diagrama de flujo algoritmo búsqueda tabú.

Según lo descrito en la sección anterior, los vecinos iniciales par_0 , se obtienen de la aplicación del muestreo por *latin hypercube*. Cada vecino, se evalúa en la función objetivo F.O, como configuración actual, para calcular un primer error de estimación (48). Posteriormente, a partir del vecino inicial, se genera un conjunto de vecinos nuevos (o vecindario) $N(par)$, por medio de transiciones simples (variación elemental del vecino inicial), para luego evaluar cada nuevo

vecino en la función objetivo, hasta encontrar el que arroje el mínimo error de estimación. Nuevamente, se genera un vecindario, con la condición de no visitar vecinos previamente evaluados. Para ello, dichos movimientos son bloqueados al incluirlos en la lista tabú. Sin embargo, el *TS* cuenta con una función denominada criterio de aspiración, la cual permite escoger soluciones que empeoran la función objetivo, con el propósito de escapar de óptimos locales. Finalmente, se adopta como criterio de parada un número máximo de iteraciones del algoritmo cuando no se consiguen grandes mejoras en la solución.

C. Paso 2.3 Determinación del error mínimo

Como se explicó anteriormente, la función objetivo para este problema de optimización consiste en minimizar la diferencia entre P_{meas} y P_{estim} , al considerar el perfil de carga p y el modelo de carga m . En este sentido, después de recorrer todas las r_{max} rutas de exploración, se determina el menor error de estimación, el cual corresponde al conjunto de parámetros que mejor representan el perfil de carga analizado.

Adicionalmente, se debe resaltar que los errores mínimos que se han encontrado en esta etapa, se comparan con un valor de tolerancia propuesta. El propósito de dicha tolerancia es el informar al analista de redes, por medio de una señal de alerta, que, aunque los errores calculados en la etapa de estimación, corresponden al menor error encontrado luego de evaluar las mejores rutas de búsqueda, el error estimado no es menor que la tolerancia propuesta. De esta forma, el analista de redes cuenta con cierta sensibilidad para realizar ajustes, dependiendo del alcance del estudio modelado que esté realizando y para el cual emplea la metodología de estimación propuesta en este estudio.

D. Paso 2.4 Selección de los parámetros más adecuados para cada modelo

Para este momento, el algoritmo ya ha recorrido los p_{max} perfiles de carga y ha estimado los parámetros y errores de los m_{max} modelos de carga para la estación. Por consiguiente, la selección de los parámetros más adecuados, consiste en elegir el conjunto de parámetros estimados para los cuales se identificó el mínimo error de estimación en el paso 2.3.

El resultado final de esta etapa es en consecuencia, los m_{max} modelos de carga parametrizados con el conjunto de parámetros estimados para los p_{max} perfiles de carga, que generan el menor error de estimación entre los demás errores de estimación calculados para cada ruta de exploración.

4.1.3 Etapa 3. Evaluación de los modelos para la estación

Una de las principales preguntas que surge al obtener la estimación de un modelo de carga está relacionado con su capacidad de generalización, es decir, si el modelo tiene la habilidad de representar condiciones de operación diferentes para las que fue ajustado. La etapa 3 de la metodología tiene como finalidad responder esta pregunta, mediante la prueba de validación cruzada [69]. La prueba de validación cruzada se inicia tomando los modelos parametrizados con un perfil de carga, y validando su respuesta con los perfiles de carga restantes, obteniendo

para cada caso, los errores de validación cruzada ($E_{m,p}$). El procedimiento se repite para los modelos de carga estimados con el perfil de carga siguiente y luego validada nuevamente con los perfiles de carga restantes, hasta evaluar todos los modelos estimados. Finalmente, los errores de validación cruzada se promedian y se obtiene el error de validación total ($E_{total,m}$) que es el indicador de precisión de los modelos estimados.

A. Paso 3.1 Evaluación del desempeño

El objetivo de esta etapa consiste en emplear los p_{max} registros de las mediciones para evaluar los v_{max} modelos parametrizados de la figura 24, obtenidos previamente. La variable v_{max} corresponde al producto de m_{max} y p_{max} , ya que cada modelo de carga m se parametriza usando cada uno de los perfiles de carga p . Lo anterior, con el propósito de analizar el comportamiento de los modelos parametrizados ante una condición operativa diferente a la empleada para su estimación.

El error de validación cruzada ($E_{m,p}$) se calcula mediante la expresión (49) y se emplea como un indicador de la capacidad de generalización de cada modelo.

$$E_{m,p} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_{meas,k,p} - P_{estim,k,m})^2 \quad (49)$$

Donde $P_{k\ meas,k,p}$ es la muestra k de la medición en potencia activa para el perfil de carga p y $P_{k\ meas,k,m}$ es la estimación de potencia activa al usar el modelo de carga m parametrizado con anterioridad, usando el conjunto de parámetros estimados par_m .

B. Paso 3.2 Cálculo del error de validación total

El error de validación total para el modelo de carga m , luego de considerar los p_{max} diferentes perfiles de carga se calcula mediante (50).

$$E_{total,m} = \frac{1}{p_{max}} \sum_{p=1}^{p_{max}} E_{m,p} \quad (50)$$

La importancia de este indicador radica en su capacidad de señalar el modelo de carga parametrizado que mejor reproduce los comportamientos de los p_{max} perfiles de carga. Dicho modelo es el que presenta la mejor capacidad de generalización, por lo tanto, tiene el menor error de validación total de todos. En consecuencia, como resultado final de esta etapa, se obtienen los modelos parametrizados con la mayor capacidad de generalización para la representación de las cargas analizadas. La siguiente sección abordará la aplicación de la metodología general para el caso en donde se considera el dispositivo de almacenamiento SMES.

4.2 Estrategia general aplicada al SMES

Como ya se mencionó, la aplicación de la metodología de estimación y selección de modelos puede aplicarse, independientemente de los modelos propuestos para la estimación. En este sentido, se presenta la aplicación de la metodología propuesta al modelo de un sistema SMES, representado por la función de transferencia que se muestra en la figura 4. Para este caso, el SMES reacciona ante diferentes condiciones operativas del sistema de potencia al cual se encuentra conectado. Finalmente, se evalúa la capacidad de generalización de dicho modelo, según lo descrito en la etapa 3 de la metodología vista para la estación de carga.

4.2.1 Etapa 1: Definición del modelo para el SMES y selección de los registros operativos

A diferencia del caso de la estación de carga para vehículos eléctricos, donde se establecieron varios modelos de carga estáticos para representar el comportamiento de los vehículos eléctricos, aquí se establece un solo modelo dinámico del SMES, el cual pretende aproximar la respuesta de todo el conjunto de elementos que componen un sistema SMES que actúa como amortiguador de oscilaciones de potencia, a una función de transferencia que se formula como un compensador de potencia del tipo adelanto/atraso.

A. Paso 1.1: Definición del modelo para el SMES

Como se mencionó en la descripción de la etapa 1 de la metodología aplicada para el SMES, el modelo para el sistema SMES, corresponde a la expresión matemática, dada en forma de la función de transferencia de un estabilizador adelanto/atraso de segundo orden. Dicha expresión relaciona una variación en la velocidad de giro de la máquina síncrona (variación en frecuencia), con la potencia que el SMES debe entregar a la red, con la finalidad de amortiguar dicha perturbación y de esta forma, ampliar el rango de estabilidad del sistema. Para efectos de modelado de un SMES típico y alcance de este trabajo, solo se analizan aquellas perturbaciones que generen inyecciones de potencia del SMES. Los estados en los que el SMES absorbe potencia de la red se proponen como trabajos futuros, debido a que se requiere de modelos para el SMES, y escenarios de simulación más robustos que los aquí propuestos.

Para este caso, y según lo descrito con anterioridad, solo se cuenta con el modelo de la función de transferencia para representar al SMES durante todo el proceso iterativo.

B. Paso 1.2: Selección de los registros operativos del SMES

Los registros operativos, son las mediciones de la velocidad de giro de la máquina síncrona que fija la frecuencia de la red, y de la potencia inyectada por el SMES, ante aquellas contingencias que producen oscilaciones en dicha frecuencia, con el propósito de amortiguarlas.

A manera de ejemplo, en la figura 30 se presenta la comparación en la operación de un sistema de máquina síncrona y SMES, con la presencia de un gobernador y regulador de la excitación, para observar los efectos sobre la estabilidad del sistema. En este caso, se propone una perturbación que consiste en ingresar una gran carga en el segundo 10, y retirarla a los 300 ms.

Se observan los escenarios, sin regulación (se retira el control del gobernador y la excitación) y sin SMES, con regulación y con SMES y con regulación y sin SMES.

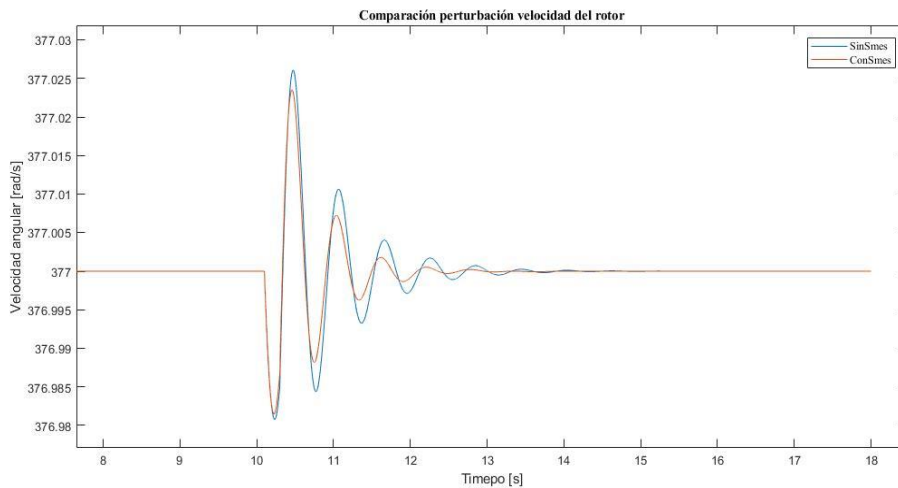


Figura 30. Comparación respuestas en velocidad del rotor casos de prueba.

De esta forma, en la figura 30 se aprecia una mejora en el desempeño que presenta el sistema cuando se incluye el SMES. Si bien el sistema con gobernador y control de la excitación no permite la inestabilidad del sistema, como se aprecia que ocurre cuando se retira la regulación, el sistema con SMES es el que presenta un comportamiento de menor oscilación ante la perturbación efectuada, que es lo que se busca con la implementación de este tipo de control del SMES.

De acuerdo con lo anterior, se recolecta un conjunto de las mediciones de la respuesta del SMES, al incluir los controles del gobernador y la excitación, ante perturbaciones similares a las antes presentadas.

4.2.2 Etapa 2. Estimación de parámetros del modelo para el SMES

Al igual que para el caso de la estación de carga para vehículos eléctricos, esta etapa está orientada a emplear las mediciones de los registros operativos del SMES, así como de la estructura de la función de transferencia del SMES, para la estimación de sus parámetros, ante cada uno de los escenarios de operación propuestos.

Los pasos 2.1 hasta 2.4 (A, B, C y D) siguen la misma lógica que para el análisis de la estación de carga, sin embargo, para este caso, el algoritmo de estimación no requiere los registros de mediciones de las corrientes, ni los consumos de los vehículos que se conectan, sino las variaciones en la frecuencia de la red, y la correspondiente inyección de potencia por parte del SMES. Un esquema de este proceso se presenta en la figura 31.

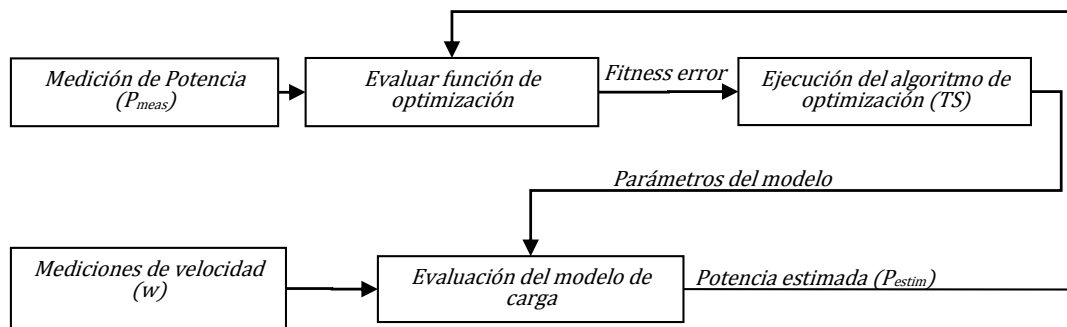


Figura 31. Estrategia de estimación de carga basada en medición aplicada al sistema SMES.

Una perturbación, debida a la conexión y desconexión súbita de una gran carga en el sistema de potencia analizado, produce variaciones en la velocidad de giro del rotor de la máquina síncrona w , (por lo tanto, también una variación en la frecuencia de la red). Ante dicha perturbación, el SMES debe reaccionar con la inyección de parte o la totalidad de la energía que tiene almacenada. La potencia entregada por el SMES, es otra de las variables de interés para la estimación de los parámetros de la función de transferencia del SMES, por lo tanto, sus registros se capturan en la lectura denotada como P_{meas} .

Con una estructura de modelo definida y con los registros de las mediciones de interés, se realiza el proceso de estimación de parámetros de manera análoga para el caso de la estación de carga, y se obtienen el conjunto de parámetros ajustados para cada una de las condiciones operativas propuestas para la estimación. Con dichos parámetros, se obtiene la respuesta aproximada del modelo del SMES, la cual está representada por P_{estim} . Finalmente, la reducción iterativa de la desviación entre ambas señales de potencia (medida y estimada), se consigue nuevamente, mediante la aplicación tanto del algoritmo de optimización *TS*, como de la inicialización con la estrategia de muestro *Latin hypercube*.

4.2.3 Etapa 3: Evaluación del modelo

Esta etapa consiste en la evaluación de la capacidad de generalización del modelo del SMES, por lo que se pretende validar su desempeño para los casos en los que se tengan perturbaciones diferentes a las consideradas para las estimaciones iniciales de los parámetros de la función de transferencia del SMES. El objetivo de esta etapa consiste en emplear los ro_{max} registros operativos de las mediciones de la respuesta del SMES, para determinar la precisión de los modelos previamente parametrizados en la etapa 2. A diferencia del caso para la evaluación del desempeño de los modelos de carga propuestos para la estación de carga, en donde se seleccionaba con ayuda del error de validación total entre varias opciones de modelos, el que disponía la mayor capacidad de generalización, en el presente caso de análisis, se dispone de un único modelo, por lo tanto, solo es necesario identificar el conjunto de parámetros estimados con la mayor capacidad de generalización. Dicha información se obtiene mediante el análisis de los errores de validación cruzada dado en (49).

A manera de ilustración, en la figura 32 se presenta un esquema del proceso que se debe seguir para realizar el método de la validación cruzada.

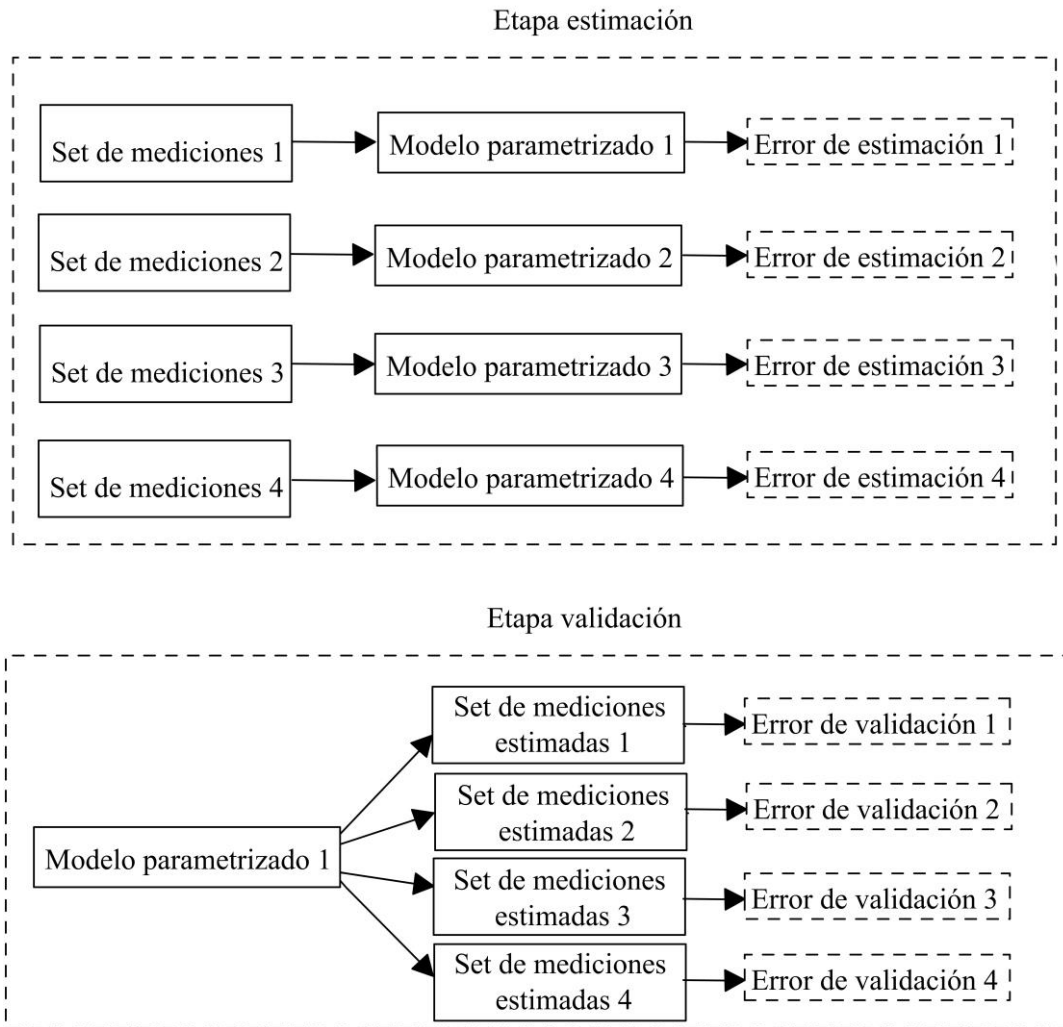


Figura 32. Esquema ilustrativo procedimiento de validación cruzada.

En la figura 32 se presenta un esquema de estimación de parámetros para un modelo específico, a partir de cuatro conjuntos diferentes de medidas. Dicho esquema obedece a la secuencia de pasos descrita en las etapas dos y tres de la metodología propuesta en esta tesis. Nótese que a partir de cada uno de los conjuntos de mediciones analizadas, se obtiene un respectivo modelo parametrizado. Al comparar la respuesta de cada uno de los modelos parametrizados, con el registro o conjunto de mediciones del cual se obtiene la estimación, se hace el cálculo de su respectivo error de estimación mediante (47). Posteriormente, con el modelo parametrizado 1 (el cual fue estimado a partir del set de mediciones 1), se busca reproducir el set de mediciones 1, 2, 3 y 4, calculando para cada caso los errores de validación 1, 2, 3 y 4, por medio de (49). Finalmente, se procede de la misma manera para los modelos parametrizados restantes.

5

Resultados obtenidos

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en el capítulo 4, para la estación de carga rápida para vehículos eléctricos y el SMES conectado a un sistema máquina síncrona y barraje infinito. En este sentido, se plantean dos escenarios de prueba para la aplicación y validación de la metodología de estimación presentada en este estudio. El escenario de prueba número uno, consiste en obtener las mediciones de la operación de una estación de carga rápida para vehículos eléctricos, instalada al final de uno de los ramales del sistema de prueba IEEE de 13 nodos. En este caso, se pretende establecer un modelo de carga parametrizado para la estación de carga de vehículos eléctricos, que represente de manera satisfactoria el comportamiento capturado a partir de las lecturas de los medidores del sistema implementado.

Por su parte, el escenario de prueba número dos, consiste en aproximar el comportamiento de un sistema compuesto por la conexión en paralelo del SMES y una máquina síncrona conectada a barraje infinito, con un modelo del SMES propuesto como compensador adelanto/atraso de segundo orden, por medio de la estimación de los parámetros de la función de transferencia que describe dicho compensador. Para el escenario de prueba uno, se busca obtener un modelo de carga parametrizado con alta capacidad de generalización, el cual pueda representar el comportamiento de la estación de carga antes las diferentes condiciones de operación, planteadas por los registros de los perfiles de carga tomados de la estación de carga. De otro lado, en el escenario dos, se pretende obtener una función de transferencia parametrizada, con capacidad de generalización y que permita sustituir el efecto de buena parte de los elementos y controladores que intervienen en la operación del SMES.

5.1 Sistemas de prueba y aplicación de la metodología

Según lo antes mencionado, se hace el análisis de dos casos de estudio, el primero se presenta en la figura 33, y corresponde una estación de carga rápida para vehículos eléctricos, localizada en el nodo 634 del sistema IEEE de 13 nodos, con una capacidad nominal de 0.5 MW, de cuya operación se obtienen seis perfiles de carga que se emplean en la metodología de estimación propuesta en este trabajo. El segundo caso de estudio, se muestra en la figura 40, en donde se puede apreciar un sistema SMES con una capacidad de almacenamiento de 10MJ conectado en paralelo con una máquina síncrona de potencia nominal 200 MVA y 13800 V.

5.1.1 Caracterización de estación de carga rápida para vehículos eléctricos

La estación de carga rápida para vehículos eléctricos está compuesta por un convertidor en fuente de tensión (VSC) de dos niveles, un conjunto de cargadores individuales de baterías, ambos interconectados por medio de un capacitor de soporte o (*DC-link*) [59]. La entrada al VSC por el lado AC, se realiza por medio de un filtro R-L, con el propósito de limitar la distorsión en la corriente que se pueda presentar [70]. El objetivo de control para este tipo de topología es mantener estable la tensión en el capacitor de soporte, sin importar los incrementos en las demandas de potencia en el lado DC debidos a la conexión de los vehículos eléctricos [71]. Sin embargo, dicho objetivo de control puede verse influenciado según las características del sistema eléctrico, ya que, para redes de característica débil; es decir, aquellos con potencias de corto circuito bajas o sistemas relativamente aislados (poco interconectado), se pueden evidenciar caídas en las tensiones de entrada al convertidor. No obstante, este no fue el caso del sistema IEEE de 13 nodos, el cual, al ser un sistema de distribución pequeño, presentó características de red fuerte durante las pruebas de simulación.

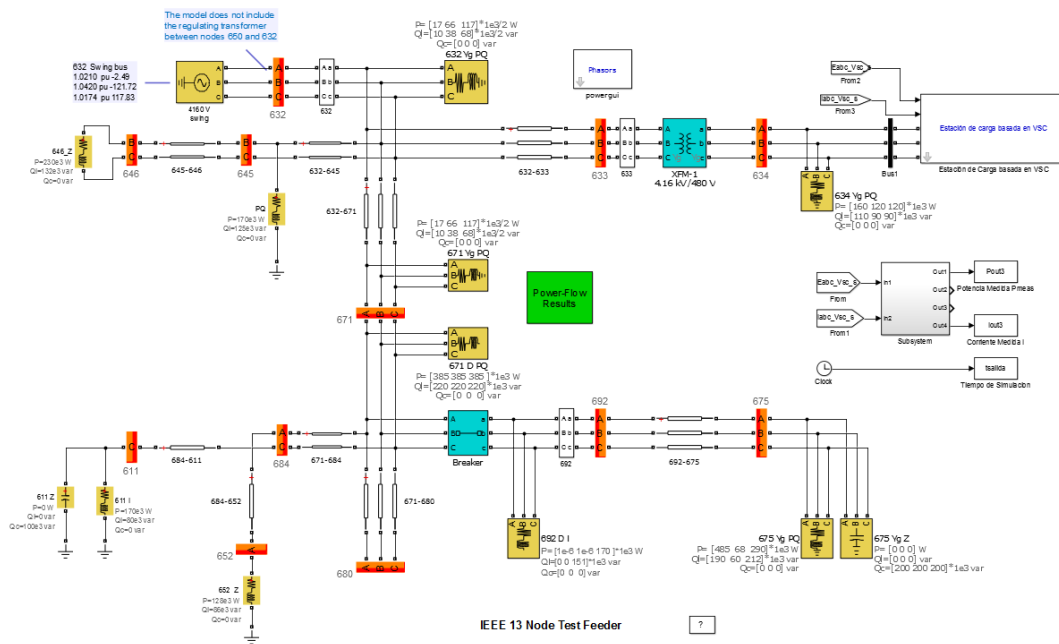


Figura 33. Sistema IEEE de 13 nodos con estación de carga rápida de vehículos eléctricos en el nodo 634.

Al seguir un procedimiento similar para la elaboración del perfil de carga del ejemplo descrito en el capítulo 4, se obtienen los 6 perfiles que se muestran en la figura 34, donde los consumos de potencia de los vehículos eléctricos se encuentran en el rango entre 36 y 350 kW. Se debe aclarar que existen diferentes estándares y protocolos para definir los rangos de tiempos de carga y potencias de los cargadores de vehículos eléctricos según [42], donde se presentan algunos de los estándares más empleados en esta materia. Los perfiles 1, 2, 3 y 4 incluyen la presencia de la característica de carga de un vehículo Tesla, la cual está descrita en (23).

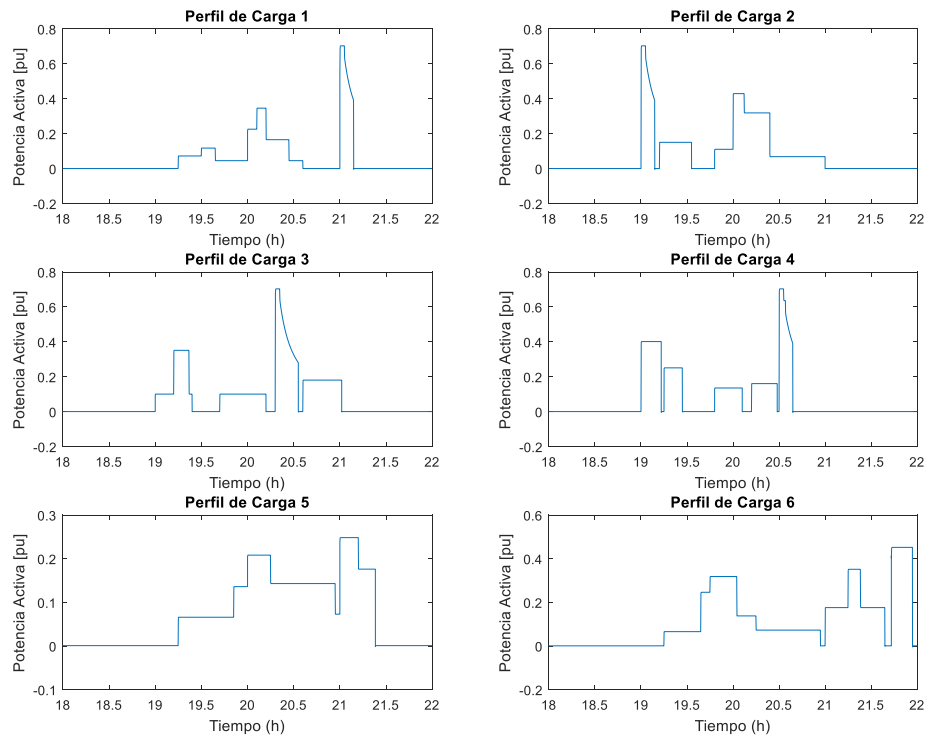


Figura 34. Sistema de prueba para estación de carga rápida de vehículos eléctricos.

A. Definición de los parámetros iniciales

Para determinar los parámetros iniciales de la técnica de optimización, se emplea la técnica *Latin hypercube*, la cual se explicó en detalle en el capítulo 4. En la figura 35 puede apreciarse un conjunto de parámetros de inicialización de los modelos (representados por marcadores), así como las rutas de la evolución iterativa producto de la ejecución del algoritmo tabú. Este resultado se obtiene de la estimación de los parámetros del modelo (P+ Exp), al emplearse la condición operativa del perfil de carga 6.

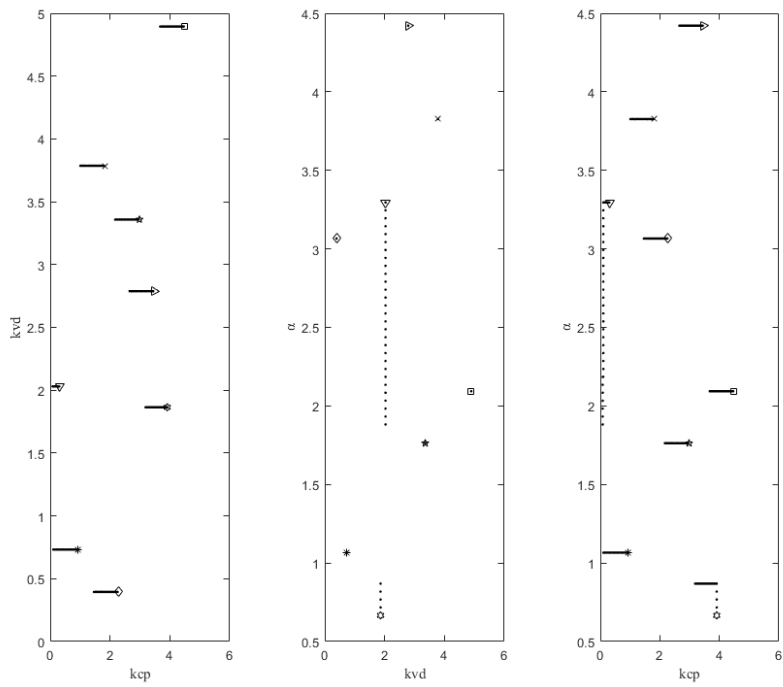


Figura 35. Inicialización y evolución de parámetros

De la figura 35, se puede apreciar que los vecinos iniciales se encuentran debidamente distribuidos en todo el espacio de búsqueda, y como ya se había analizado en el capítulo 4, no se presentan aglomeraciones de vecinos iniciales en un sector específico del espacio solución, caso que podría darse si la inicialización fuera totalmente aleatoria, como se mostró en el mismo capítulo 4.

Por su parte, en la figura 36 se presenta la evolución del error de estimación para las 8 rutas previamente analizadas. Para efectos de resolución del procedimiento, se presenta un rango comprendido entre las iteraciones 230 a 260.

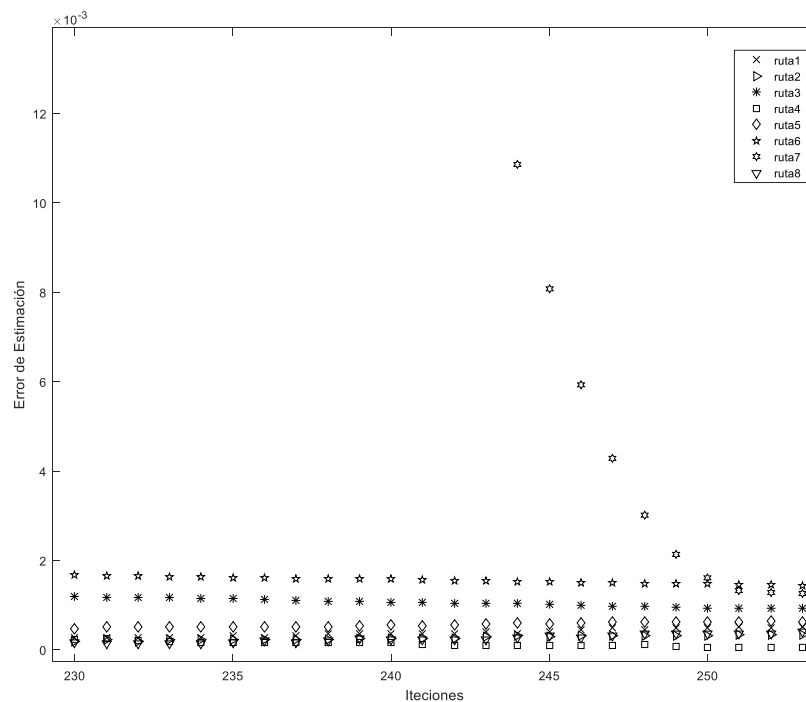


Figura 36. Evolución del error de estimación

Así mismo, de la figura 36 se puede notar que, para el rango de iteraciones mostrado, a pesar de que las configuraciones iniciales de los vecinos parten desde sitios diferentes (inicialización guiada por la estrategia de muestreo *Latin hypercube*), la mayoría de las rutas seguidas por el algoritmo encuentran un vecindario potencialmente bueno (valores de la incógnita comprendidos entre el rango de $0,1e-3$ y $2e-3$ unidades de error). Sin embargo, a la ruta 7, le toma más tiempo llegar a un vecindario con dichas características. No obstante, el criterio de aspiración que presenta *TS*, de tomar soluciones que empeoran la función objetivo, permite escapar de óptimos locales y finalmente encontrar un vecindario de mejor calidad.

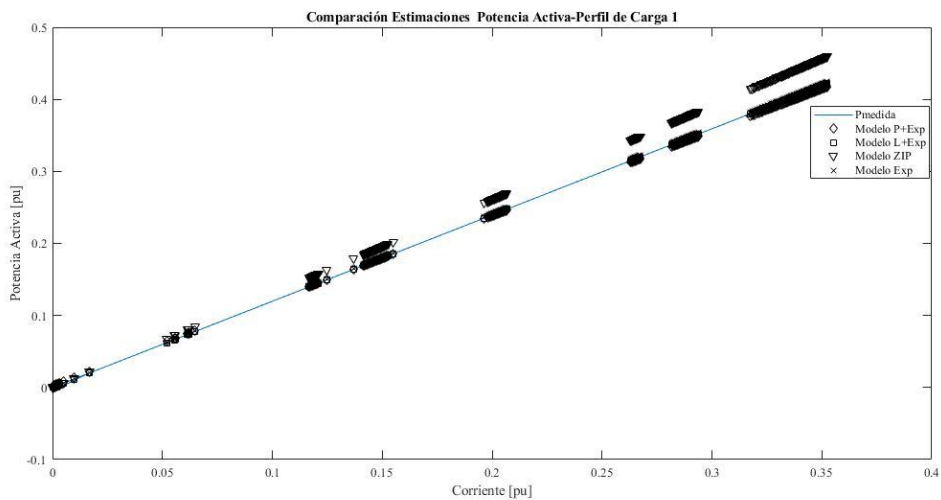
B. Selección de los parámetros más adecuados

En la segunda etapa de la metodología propuesta en la figura 24, se consideran todos los perfiles de carga y todos los modelos de carga propuestos para la estación, para llevar a cabo la estimación de parámetros que presenten el mínimo error de estimación. Al final de esta etapa, se obtienen los parámetros que arrojan el mínimo error de estimación para cada caso. En la tabla 3 se presentan los parámetros y errores estimados para los cuatro modelos analizados.

Tabla 3. Estimación de los parámetros y del mínimo error de estimación para los modelos y perfiles de carga.

Parámetros <i>par</i>	Número del perfil de carga <i>p</i>					
	1	2	3	4	5	6
<i>m = modelo P + EXP</i>						
<i>kcp</i>	1,690e-03	3,547e-03	1,579e-04	3,442e-05	3,525e-03	5,354e-03
<i>kvd</i>	1,173	1,237	1,217	1,222	1,222	1,240
α	0,994	1,040	1,010	1,012	1,019	1,039
$E_{m,par,p}$	4,591e-06	1,137e-05	1,503e-06	2,723e-06	6,070e-06	1,085e-05
<i>m = modelo L + EXP</i>						
<i>k₁</i>	1,197	1,185	1,186	1,198	1,190	1,183
<i>k₂</i>	0,012	0,012	0,010	0,008	0,007	0,019
α	26,625	0,986	0,898	27,116	0,941	1,210
$E_{m,par,p}$	4,745e-09	4,821e-09	9,030e-09	2,727e-08	9,500e-10	4,486e-08
<i>m = modelo ZIP</i>						
<i>C₁</i>	0,246	0,391	0,002	0,143	0,052	0,070
<i>C₂</i>	1,043	0,961	1,188	1,097	1,180	1,169
<i>C₃</i>	0,015	0,025	0,002	0,013	0,001	0,002
$E_{m,par,p}$	1,620e-04	1,131e-04	2,964e-06	1,294e-04	7,769e-07	1,571e-06
<i>m = modelo EXP</i>						
<i>k₁</i>	1,198	1,197	1,190	1,190	1,183	1,187
α	0,996	0,998	0,996	0,997	0,996	0,991
$E_{m,par,p}$	7,120e-07	1,363e-07	1,504e-07	2,558e-07	1,327e-07	8,625e-07

En la figura 37 se grafican las respuestas de los 4 modelos analizados, al emplear los parámetros estimados, los cuales se enlistan en la tabla 3, para los registros de las lecturas correspondientes al perfil de carga 1. Adicionalmente, se observa que aunque los errores presentados para un mismo perfil por los diferentes modelos son bajos, existe un modelo con el menor error de todos.



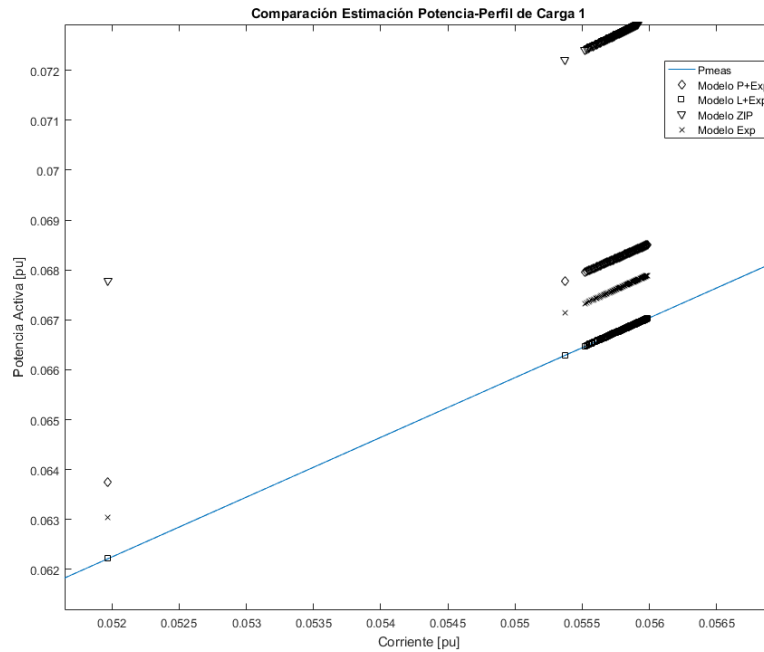


Figura 37. Comparación estimación de todos los modelos (original-ampliada).

En el gráfico comparativo mostrado en la figura 37, se puede apreciar que los modelos P+Exp, L+Exp y Exp, es decir, aquellos que cuentan con una componente del tipo exponencial presentan gran afinidad con la respuesta real de la carga (P_{meas}). Por su parte, el modelo polinomial, que no presenta comportamiento exponencial se aleja del desempeño deseado en la estimación. Así mismo, nótese que el modelo L+Exp se traslapa con la medida real. Por tal motivo, este resultado sugiere que una estructura adecuada para representar la estación de carga analizada, debe disponer de una componente exponencial, la cual como ya se ha venido mencionando, debe estar en función de la corriente en el barraje del VSC. Por otro lado, debido a que tanto el modelo ZIP, como el P+EXP, se alejan del comportamiento desarrollado por la carga, se concluye que la componente de potencia constante no adecuada para describir la respuesta de la carga.

C. Evaluación del modelo

Finalmente, al considerar, por un lado, los errores mínimos obtenidos de analizar cada una de las trayectorias propuestas para la ejecución del algoritmo TS , así como los errores estimados luego de aplicar la estrategia de validación cruzada, se realiza el cálculo del error de validación total, al promediar todos los errores de validación de los modelos de carga para la estación (es decir, al calcular el error de validación total $E_{m,p}$). Dichos resultados se grafican en la figura 38, con el propósito de visualizar el desempeño de los 4 modelos de carga analizados, con respecto al perfil de carga con el que se realice la estimación de la respuesta de los modelos.

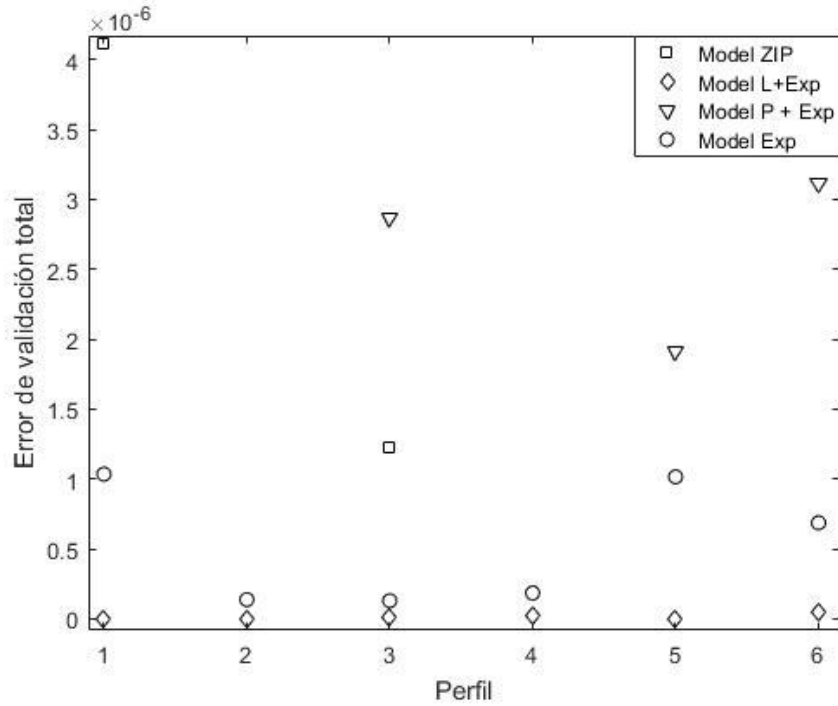


Figura 38. Error de validación total de los modelos de carga analizados.

Al analizar dichos resultados, se confirma el hecho de que los modelos P+Exp y ZIP presentan los errores de validación total más altos. Como ya se había sugerido, esta situación se presenta debido a que sus estructuras de modelo cuentan con una componente de potencia constante. En este sentido, los modelos L+Exp y Exp son los que mejor representan el comportamiento de la estación de carga rápida de vehículos eléctricos, donde para ambos casos el error total de validación alcanza un valor menor a $1E-6$. La representación de la respuesta del modelo L+Exp para los seis perfiles de carga se presenta en la figura 39, donde puede observarse que la curva de la potencia activa estimada se traslapa con la curva de potencia activa medida.

Es importante mencionar que la metodología propuesta puede aplicarse a otros modelos de carga y a otro tipo de perfiles, lo que permite su generalización y aplicabilidad.

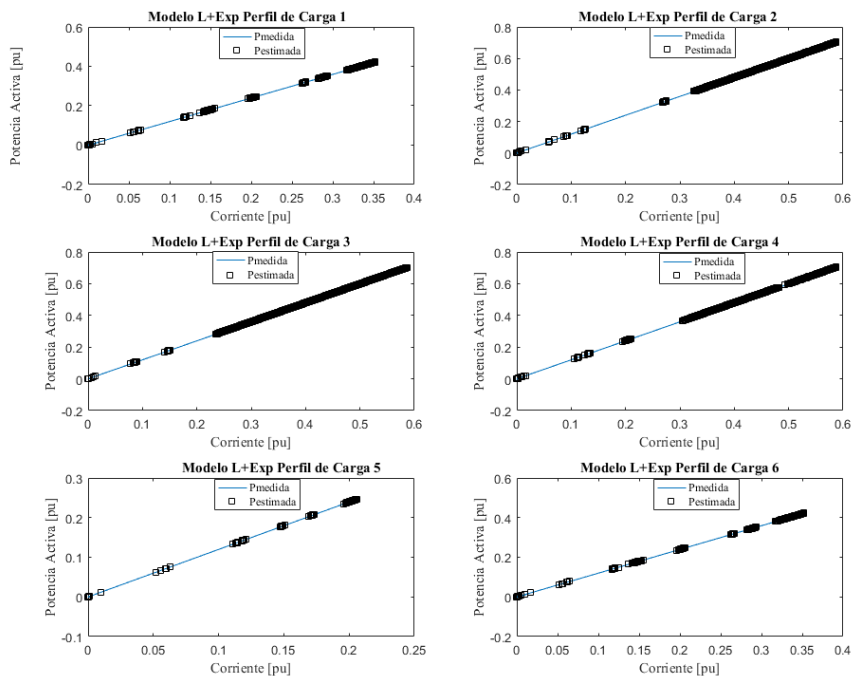


Figura 39. Comparación entre medición y respuesta del mejor modelo encontrado.

5.1.2 Caracterización de SMES conectado a sistema máquina síncrona-barraje infinito

Como se especifica al inicio del presente capítulo, la importancia de aplicar la metodología de estimación de modelos a un sistema de almacenamiento como el SMES, radica en la posibilidad de comprobar que la estrategia propuesta en esta tesis, puede emplearse para aproximar el comportamiento de diferentes dispositivos o elementos conectados en las redes eléctricas modernas. Adicionalmente, se refuerza el hecho de que la metodología presentada funciona independientemente del tipo de la estructura de modelo propuesta por el analista de redes.

Para el caso particular presentado en esta sección, se busca representar la acción de un sistema SMES en conexión paralelo con una máquina síncrona conectada a barraje infinito, (como el mostrado en la figura 40), por medio de la parametrización de la función de transferencia mostrada en la figura 4, al considerar cuatro diferentes estados operativos, recopilados e identificados como registros operativos del SMES, según se describe en el capítulo cuatro en la sección orientada para la estimación de los parámetros de la función de transferencia del SMES.

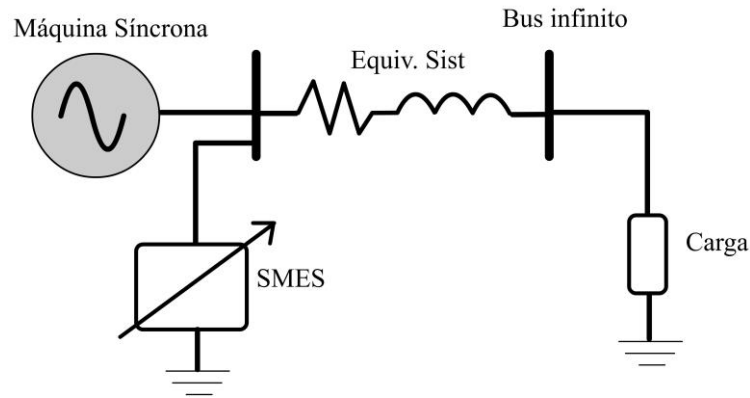


Figura 40. Sistema de prueba SMES.

Como ya se ha mencionado, la aplicación que tiene el sistema de SMES implementado en este estudio, consiste en brindar soporte para el amortiguamiento de oscilaciones en la frecuencia de la red, ante cierto tipo de contingencias. En razón a lo anterior, se adopta un sistema de simulación para el SMES basado en el método fasorial descrito en [72]. Entre algunas de las consideraciones al aplicar esta forma de simulación del SMES se tienen: No se consideran las conmutaciones de los convertidores electrónicos de estado sólido. En lugar de esto, el convertidor se aproxima como una fuente de corriente controlada [72]. Se incluye un sistema detallado de las diferentes acciones de control sobre las variables del sistema SMES y finalmente, se tiene en cuenta el efecto dinámico que tiene la descarga de la bobina superconductora sobre la red.

El método fasorial tiene la ventaja de minimizar los tiempos de cómputo y permite realizar estudios más detallados de fenómenos electromagnéticos de corto plazo, como los que se pueden presentar al incluir un sistema como el SMES. Con el propósito de presentar las ventajas que se consiguen con la inclusión del SMES sobre el sistema de prueba se ilustra en forma comparativa la respuesta del sistema con SMES en la figura 41.

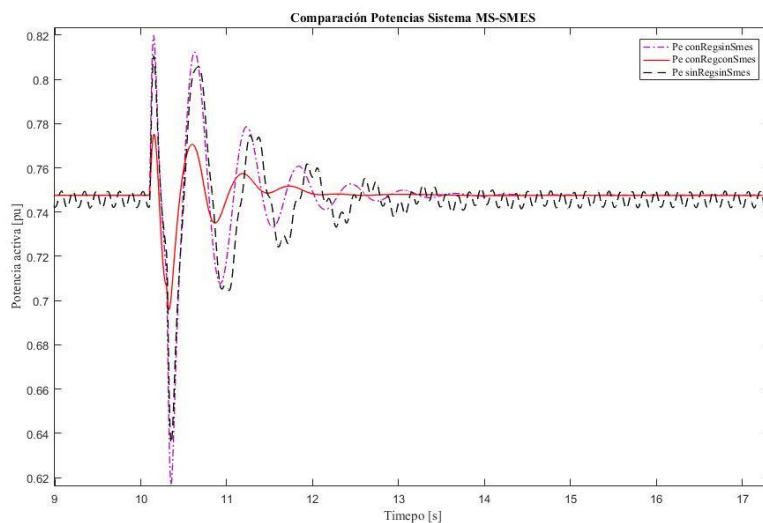


Figura 41. Comparación respuestas en potencia casos de prueba.

Puede evidenciarse, al igual que para la respuesta en la velocidad del rotor de la máquina síncrona, que la presencia del SMES reduce en gran medida las oscilaciones en la red ante una perturbación en la frecuencia del sistema.

Para continuar con el desarrollo de la metodología de estimación de modelos aplicada para el SMES, se prosigue con la obtención de los registros operativos del SMES, al considerar diferentes condiciones operativas de la red. Como se mencionó en el capítulo 3 de la presente tesis, los registros operativos se obtienen al variar tanto el tamaño como los tiempos de entrada y salida de la carga resaltada en el recuadro de perturbación mostrada en la figura 23. Dichos registros se muestran en la figura 42.

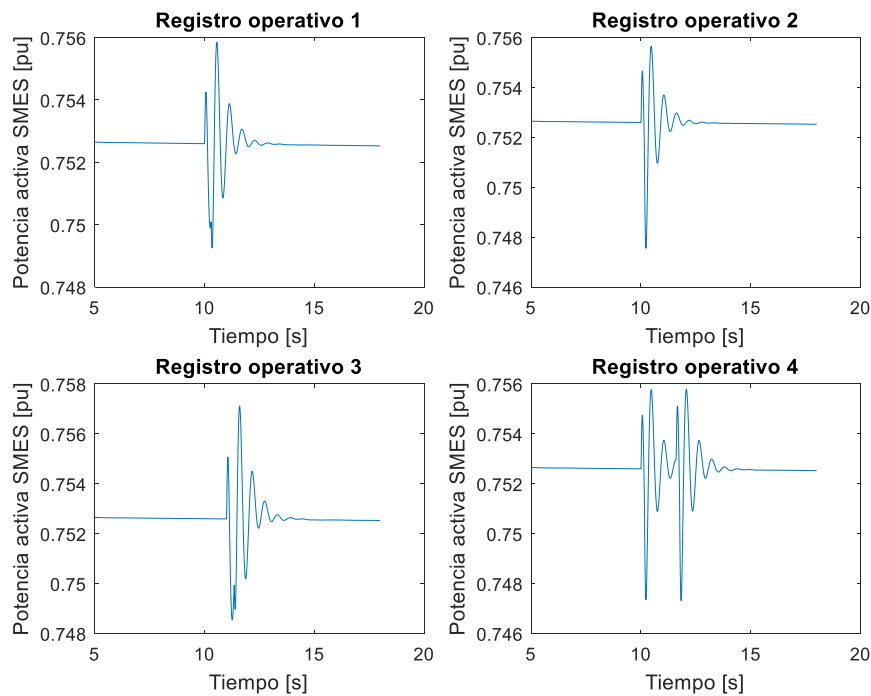


Figura 42. Registros operativos en potencia capturados de la operación del SMES.

A. Etapa de estimación

A diferencia del escenario de prueba uno, en el que se consideraban cuatro estructuras de modelos para aproximar la operación de la estación de carga para vehículos eléctricos, en el escenario 2 solo se dispone de un solo modelo, el cual está representado por la función de transferencia mostrada en la figura 4. Por tal motivo, la aplicación de la metodología de estimación propuesta en este estudio para el análisis del SMES, puede verse más claramente al seguir la secuencia de actividades presentada en el esquema ilustrativo de la validación cruzada mostrada con anterioridad en la figura 32.

En consecuencia, el paso inicial consiste en obtener todos los modelos parametrizados y sus errores de estimación correspondientes a partir de los cuatro registros operativos presentados en la figura 42 (set de mediciones) propuestos para la estimación de los parámetros del modelo del SMES.

A manera de ejemplo, en la tabla 4, se resume la información de los valores obtenidos durante la estimación de los parámetros de la función de transferencia del SMES (modelo parametrizado), al considerar el registro operativo 1.

Tabla 4. Parámetros estimados y error de estimación para el registro operativo 1.

Parámetros	Valor
T_1	0,0015
T_2	0,1412
T_3	0,2424
T_4	0,1318
T_{smes}	0,3679
Error de estimación	0,000350

Posteriormente, con el algoritmo de optimización implementado, se obtienen los modelos parametrizados con el mínimo error de estimación para cada uno de los registros operativos. Esta información se enlista en la tabla 5.

Tabla 5. Estimación de los parámetros y del mínimo error de estimación.

Parámetros <i>par</i>	Número del registro operativo <i>ro</i>			
	1	2	3	4
t_1	0,0056	0,2229	0,0064	0,2038
t_2	0,2250	0,1633	0,1416	0,1628
t_3	0,2614	0,0047	0,1417	0,0106
t_4	0,1388	0,1606	0,3065	0,4354
t_{smes}	0,6753	0,5780	0,3068	0,4411
$E_{m,par,p}$	5,738e-4	4,6400e-4	6,4255e-4	8,3360e-4

Vale la pena destacar que, en este caso, los mínimos errores de estimación encontrados, son mayores que los obtenidos en la parametrización de los modelos propuestos para la estación de carga de vehículos eléctricos. Este hecho se debe a dos razones principales, la primera es que la complejidad del modelo creció drásticamente, ya que el sistema es ahora de naturaleza dinámica, y en este caso se debe aplicar alguna de las técnicas de solución para sistemas de ecuaciones diferenciales, para obtener la respuesta del modelo. Finalmente, la segunda razón radica en que, como el número de parámetros a estimar aumenta, es de esperarse una disminución en la precisión de la estimación, como se menciona en la revisión bibliográfica alusiva al tema de la estimación de modelos.

B. Etapa de validación

Como ya se dispone de los modelos parametrizados más adecuados para representar cada una de las condiciones operativas con las cuales fueron estimados, el siguiente paso consiste en evaluar la capacidad de generalización de cada uno de los modelos. En este sentido, y como se ilustra en la figura 32, se toma cada uno de los modelos parametrizados y se ingresan las variaciones en la velocidad del rotor de la máquina, capturadas por los registros operativos. La respuesta en potencia obtenida al evaluar dicha entrada en velocidad en cada uno de los modelos

parametrizados, se compara con la lectura en potencia originalmente tomada del sistema de potencia implementado. Dicha comparación se realiza mediante la métrica del error propuesta y denominada error de validación cruzada (49).

Finalmente, con el propósito de analizar cuál de los modelos parametrizados logra reproducir de mejor manera todas las condiciones operativas planteadas, se grafican los errores de validación cruzada, como se muestra en la figura 43.

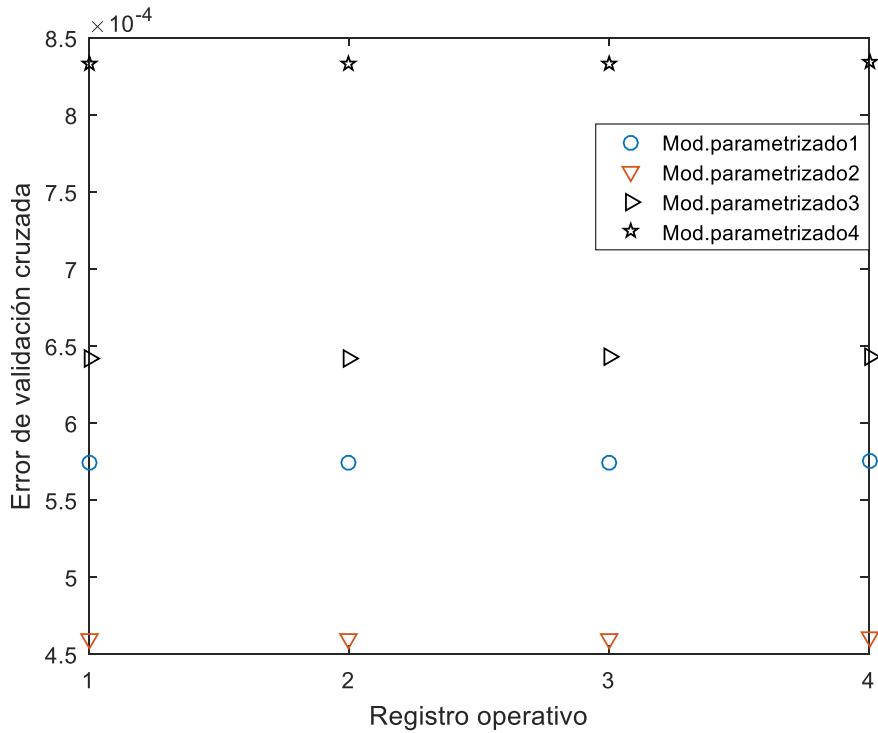


Figura 43. Comparación error de validación cruzada.

Del análisis de la figura 43, se puede concluir que el conjunto de parámetros estimados para el registro operativo 2 (Mod.parametrizado 2) presenta el menor error de validación cruzada (mayor capacidad de generalización), y por lo tanto, se selecciona como la parametrización del modelo de la función de transferencia que debe representar la operación del SMES.

Por su parte, en la figura 44 se presenta la comparación entre la medición de la operación del SMES (Psmes medida) y la respuesta obtenida con el modelo parametrizado (Psmes estimada), seleccionado para representar la operación del SMES.

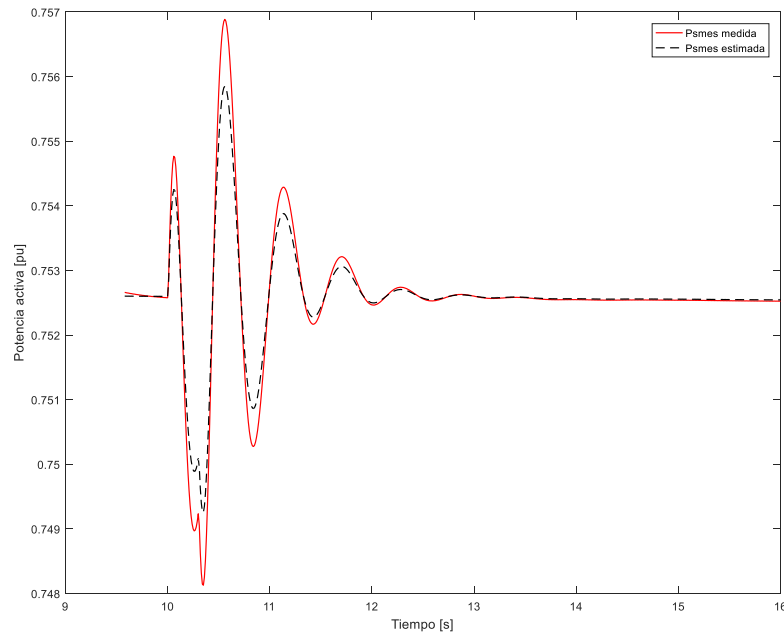


Figura 44. Comparación potencia estimada y medida.

En este caso se observa que la respuesta del modelo estimado reproduce la dinámica de la perturbación atendida por el sistema SMES. No obstante, los picos máximos y mínimos no logran ser alcanzados totalmente por la estimación. Lo anterior sugiere que se debe emplear un modelo más detallado, por medio del cual, se consiga replicar de mejor manera el efecto proporcional de los controladores internos del SMES.

A pesar de lo anterior, es de resaltar que la estimación desempeña un buen trabajo en el instante de interés para este estudio, es decir, en el periodo oscilatorio cuando se genera la perturbación en el sistema. De hecho, tanto el control implementado para esta aplicación del SMES, como la formulación de la función de transferencia que se viene empleado, están diseñados para desenvolverse de manera satisfactoria en estos periodos en particular. Por tal motivo, la respuesta obtenida al aplicar la metodología de estimación y selección de modelos presentada en esta tesis, desarrolla un desempeño satisfactorio para este nuevo caso de estudio.

6

Conclusiones

6.1 Conclusiones finales y recomendaciones

La estrategia de modelado de carga a partir de mediciones es una herramienta que se puede aprovechar para resolver algunas de las problemáticas clásicas en el modelado de cargas. Por ejemplo, en este trabajo de investigación, se aborda fundamentalmente, el tema de caracterización y actualización de modelos para cargas modernas. En este sentido, se logró plantear una metodología sistemática y de ágil implementación, que permite seleccionar entre varias opciones de representación matemática y al considerar diferentes condiciones operativas de los dispositivos a modelar, aquellos modelos que aproximen de mejor manera, el comportamiento real de dichos elementos modernos presentes en las redes eléctricas actuales.

Entre los aportes más relevantes en la aplicación de metodología de estimación propuesta en este trabajo, se destaca la implementación en conjunto de la estrategia de muestreo *Latin Hypercube* y del algoritmo de optimización *TS*, ya que se logró potenciar la capacidad de búsqueda del algoritmo de optimización, al garantizar la creación de rutas de búsqueda diversas, que permitieron explorar mayor cantidad de vecindarios, debido a que se redujo el aglutinamiento de vecinos iniciales en ciertas zonas del espacio de búsqueda, lo que permitió reducir la probabilidad de estancarse en óptimos locales, y adicionalmente, se consiguió establecer sensibilidades sobre el espacio de búsqueda del problema de optimización analizado.

Otro aspecto de gran relevancia analizado en el presente trabajo de investigación, consistió en la definición de las estructuras de los modelos empleados para representar los vehículos eléctricos y el sistema SMES. En este sentido, tanto la revisión bibliográfica realizada acerca de los modelos más empleados para dichos elementos, así como la etapa de implementación de los mismos en ambiente de simulación, permitió establecer que:

- Para el caso de la estación de carga para vehículos eléctricos, debido a que el estudio de modelado estaba orientado a representar condiciones operativas típicas, es decir, no se consideraron eventos de contingencia o fallos, la representación por medio de modelos estáticos cumple con dicha presunción. Adicionalmente, dado a que se analizaron los estados en que los vehículos eléctricos realizaban el proceso de recarga de sus baterías, los tiempos presentados eran relativamente largos como para utilizar modelos dinámicos, los

cuales son mucho más complejos y generalmente, se emplean para representar dinámicas rápidas de las cargas.

- Por su parte, en el caso del SMES, como el principal objetivo era representar la respuesta instantánea del SMES, ante perturbaciones en la frecuencia de la red, si fue necesario emplear un modelo dinámico que permitiera aproximar buena parte del complejo sistema de controles y convertidores embebidos en el sistema SMES.

De acuerdo a la problemática que se tiene para el modelado de elementos de cargas modernas, se encuentra que en la actualidad, no existen propuestas iterativas que permitan la evaluación masiva de diferentes modelos de carga para establecer la pertinencia de cada modelo en la representación de cargas como las estudiadas a lo largo de la presente tesis. En este sentido, es de resaltar la estrategia basada en indicadores basados en el error, ya que se consigue elegir los modelos más adecuados a partir de datos cuantitativos que pueden ser comparados y analizados en detalle por el analista de redes.

Finalmente, aunque la etapa de implementación de los sistemas de prueba, no hace parte de la metodología descrita en el presente documento, parte del trabajo invertido en ella, se evidencia en las formulaciones de los controles presentados en el capítulo 3. Dicho estudio es muy pertinente, ya que el conocimiento de las metodologías y estrategias de control aplicadas para los elementos presentes en sistemas modernos, como las estaciones de carga para vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía, como el sistema SMES, permitió la reformulación de los modelos para los vehículos eléctricos, como función de la corriente en el barraje del convertidor VSC, al observar que dicha variable de control era quien presentaba la mayor variación ante la entrada y salida de los vehículos de la estación.

6.2 Trabajos futuros

Según los objetivos alcanzados y el trabajo realizado se plantean los siguientes trabajos futuros:

- Analizar modelos dinámicos de cargas para aproximar el comportamiento de otro tipo de sistemas de almacenamiento de energía, como los supercapacitores o los Fly-wheels.
- Ampliar la metodología para incluir una etapa de filtrado del ruido de las mediciones para garantizar una metodología más robusta.
- De acuerdo a los estudios obtenidos, ampliar las estructuras de modelos para estimar modelos con características de carga diferentes a las encontradas en este trabajo.
- Analizar cómo se afectaría la etapa de estimación de modelos, cuando se incluyen fenómenos como la agregación de carga.

7

Bibliografía

- [1] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, “Modeling and planning of EV fast charging station in power grid,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
- [2] A. Ortega and F. Milano, “Generalized model of vsc-based energy storage systems for transient stability analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 1–12, 2016.
- [3] T. Das and D. C. Aliprantis, “Small-signal stability analysis of power system integrated with PHEVs,” in *2008 IEEE Energy 2030 Conference, ENERGY 2008*, 2008.
- [4] A. Arias, M. Granada, and C. A. Castro, “Optimal probabilistic charging of electric vehicles in distribution systems,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 7, no. 3, pp. 246–251, 2017.
- [5] A. M. A. Haidar and K. M. Muttaqi, “Behavioral characterization of electric vehicle charging loads in a distribution power grid through modeling of battery chargers,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 1, pp. 483–492, 2016.
- [6] M. C. Kisacikoglu, B. Ozpineci, and L. M. Tolbert, “EV/PHEV bidirectional charger assessment for V2G reactive power operation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5717–5727, 2013.
- [7] M. F. Shaaban and E. F. El-Saadany, “Probabilistic modeling of PHEV charging load in distribution systems,” in *2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2013*, 2013.
- [8] B. Liao *et al.*, “Load modeling for electric taxi battery charging and swapping stations: Comparison studies,” in *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference, SPEC 2016*, 2017.
- [9] C. T. Pham and D. Månsson, “On the physical system modelling of energy storages as equivalent circuits with parameter description for variable load demand (Part I),” *J. Energy Storage*, vol. 13, pp. 73–84, 2017.
- [10] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load representation for dynamic performance analysis (of power systems),” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 472–482, 1993.
- [11] P. Kundur, “Power system stability and control,” *McGraw-Hill*. pp. 45–138, 1994.

- [12] L. F. Rodríguez, S. M. Pérez, and J. J. Mora, “Estimación de Parámetros de un Modelo de Carga de Recuperación Exponencial Empleando Técnicas Metaheurísticas,” *Sci. Tech. Año XVIII*, vol. 18, no. 3, pp. 453–462, 2013.
- [13] D. Karlsson and D. J. J. Hill, “Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 1994.
- [14] J. H. Shi, “Measurement-based load modeling - model structure,” *2003 IEEE Bol. Power Tech Conf. Proceedings*, vol. 2, pp. 631–635, 2003.
- [15] L. Rodríguez-García, S. Pérez-Londoño, and J. Mora-Flórez, “Measurement-based exponential recovery load model: development and validation,” *Dyna*, 2015.
- [16] E. De Tuglie, G. Patrono, and F. Torelli, “A sensitivity -based approach for static and dynamic load parameter estimation,” in *2005 IEEE Russia Power Tech, PowerTech*, 2005.
- [17] S. M. Pérez Londoño, L. F. Rodríguez García, and J. J. Mora Flórez, “Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación,” *Rev. Tecnura*, vol. 19, no. 44, p. 171, 2015.
- [18] H. Renmu, M. Jin, and D. J. Hill, “Composite load modeling via measurement approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 663–672, 2006.
- [19] V. Vignesh, S. Chakrabarti, and S. C. Srivastava, “An experimental study on the load modelling using PMU measurements,” in *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, 2014, pp. 1–5.
- [20] S. M. Pérez Londoño, L. F. Rodríguez García, and J. J. Mora Flórez, “Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación,” *Rev. Tecnura*, vol. 19, no. 44, p. 171, 2015.
- [21] F. Glover, “Tabu search fundamentals and uses,” *Vasa*, 1995.
- [22] J. Santa, M. Granada, “Optimización combinatoria,” *1era edición. Corporación universidad libre*, 2017.
- [23] M. Qiu, Z. Fu, R. Eglese, and Q. Tang, “A Tabu Search algorithm for the vehicle routing problem with discrete split deliveries and pickups,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 100, pp. 102–116, 2018.
- [24] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code,” *Technometrics*, vol. 42, no. 1, pp. 55–61, 2000.
- [25] D. Donovan, K. Burrage, P. Burrage, T. A. McCourt, B. Thompson, and E. Yazici, “Estimates of the coverage of parameter space by Latin Hypercube and Orthogonal Array-based sampling,” *Appl. Math. Model.*, vol. 57, pp. 553–564, 2018.
- [26] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, “Energy storage systems-Characteristics and comparisons,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008.
- [27] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberg, and W. Rosehart, “Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources,” in *Energy Storage for Smart Grids: Planning and Operation for Renewable and Variable Energy Resources (VERs)*, 2014.
- [28] M. Aneke and M. Wang, “Energy storage technologies and real life applications – A

- state of the art review,” *Applied Energy*, vol. 179. pp. 350–377, 2016.
- [29] C. A. Luongo, “Superconducting storage systems: An overview,” *IEEE Trans. Magn.*, 1996.
- [30] M. H. Ali, B. Wu, and R. A. Dougal, “An overview of SMES applications in power and energy systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2010.
- [31] V. Karasik, K. Dixon, C. Weber, B. Batchelder, G. Campbell, and P. Ribeiro, “SMES for power utility applications: A review of technical and cost considerations,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1999.
- [32] W. Gil-González and O. D. Montoya, “Passivity-based PI control of a SMES system to support power in electrical grids: A bilinear approach,” *J. Energy Storage*, vol. 18, pp. 459–466, 2018.
- [33] P. Bhatt, R. Roy, and S. P. Ghoshal, “Comparative performance evaluation of SMES-SMES, TCPS-SMES and SSSC-SMES controllers in automatic generation control for a two-area hydro-hydro system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 10, pp. 1585–1597, 2011.
- [34] P. Bhatt, S. P. Ghoshal, and R. Roy, “Load frequency stabilization by coordinated control of thyristor controlled phase shifters and superconducting magnetic energy storage for three types of interconnected two-area power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2010.
- [35] X. Lin, Y. Lei, and Y. Zhu, “A novel superconducting magnetic energy storage system design based on a three-level T-type converter and its energy-shaping control strategy,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 162, pp. 64–73, 2018.
- [36] M. M. Gavrilovic, “Optimal control of SMES systems for maximum power system stability and damping,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 199–205, 1995.
- [37] N. Daina, “Modelling Electric vehicle use and charging behaviour,” 2014.
- [38] W. Enang and C. Bannister, “Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74. pp. 1210–1239, 2017.
- [39] K. L. Butler, M. Ehsani, and P. Kamath, “A matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 1999.
- [40] K. B. Wipke, M. R. Cuddy, and S. D. Burch, “ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 1999.
- [41] D. W. Gao, C. Mi, and A. Emadi, “Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles,” *Proc. IEEE*, 2007.
- [42] L. Rubino, C. Capasso, and O. Veneri, “Review on plug-in electric vehicle charging architectures integrated with distributed energy sources for sustainable mobility,” *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 438–464, 2017.
- [43] T. S. Bryden, A. J. Cruden, G. Hilton, B. H. Dimitrov, C. P. de León, and A. Mortimer, “Off-vehicle Energy Store Selection for High Rate EV Charging Station,” in *6th Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2016)*, 2016, p. 26 (9 .)-26 (9 .).

- [44] P. Fan, B. Sainbayar, and S. Ren, "Operation Analysis of Fast Charging Stations With Energy Demand Control of Electric Vehicles," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1819–1826, 2015.
- [45] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Impact of electric vehicle load on power system oscillatory stability," *2013 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2013*, 2013.
- [46] Y. Kongjeen and K. Bhummkittipich, "Modeling of electric vehicle loads for power flow analysis based on PSAT," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2016*, 2016.
- [47] E. Sortomme, A. I. Negash, S. S. Venkata, and D. S. Kirschen, "Voltage dependent load models of charging electric vehicles," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013.
- [48] K. S. Metallinos, T. A. Papadopoulos, and C. A. Charalambous, "Derivation and evaluation of generic measurement-based dynamic load models," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 193–200, 2016.
- [49] A. Ul-Haq, C. Cecati, and E. El-Saadany, "Probabilistic modeling of electric vehicle charging pattern in a residential distribution network," *Electr. Power Syst. Res.*, 2018.
- [50] J. Brady and M. O'Mahony, "Modelling charging profiles of electric vehicles based on real-world electric vehicle charging data," *Sustain. Cities Soc.*, 2016.
- [51] M. Shepero and J. Munkhammar, "Spatial Markov chain model for electric vehicle charging in cities using geographical information system (GIS) data," *Appl. Energy*, 2018.
- [52] W. Yang, Y. Xiang, J. Liu, and C. Gu, "Agent-Based Modeling for Scale Evolution of Plug-in Electric Vehicles and Charging Demand," *IEEE Trans. Power Syst.*, 2018.
- [53] N. Amaro, J. M. Pina, J. Martins, and J. M. Ceballos, "Integration of SMES devices in power systems - Opportunities and challenges," in *Proceedings - 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics, CPE 2015*, 2015.
- [54] A. A. Edris *et al.*, "Proposed terms and definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1997.
- [55] A. P. Mohammad Reza, M. Hossine Ali, and S. Abbas, "Voltage stabilization of VSI SMES capacitors and voltage sag compensation by SMES using novel switching strategies," *Energy*, 2010.
- [56] J. Zhu, W. Yuan, T. A. Coombs, and Q. Ming, "Simulation and experiment of a YBCO SMES prototype in voltage sag compensation," *Phys. C Supercond. its Appl.*, 2011.
- [57] G. H. Kim *et al.*, "A novel HTS SMES application in combination with a permanent magnet synchronous generator type wind power generation system," in *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2011.
- [58] M. Nandi, C. K. Shiva, and V. Mukherjee, "Frequency stabilization of multi-area multi-source interconnected power system using TCSC and SMES mechanism," *J. Energy Storage*, 2017.
- [59] R. I. Amirnaser Yazdani, "Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications," in *Private Equity and Venture Capital in Europe*, vol. 13,

no. c, 2010, pp. 187–204.

- [60] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, “Current control techniques for three-phase voltage-source pwm converters: A survey,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 691–703, 1998.
- [61] S. Golestan, F. D. Freijedo, A. Vidal, J. M. Guerrero, and J. Doval-Gandoy, “A quasi-type-1 phase-locked loop structure,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014.
- [62] A. Isidori, A. J. Krener, and S. Monaco, “Nonlinear Decoupling via Feedback: A Differential Geometric Approach,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1981.
- [63] W. H. Kersting, “Radial distribution test feeders,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, 2001.
- [64] H. Daniel, *Power electronics*. 2011.
- [65] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, “Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid,” in *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2011 Conference: Smarter Grid for Sustainable and Affordable Energy Future*, 2011.
- [66] M. M. Rahman, S. Barua, S. T. Zohora, K. Hasan, and T. Aziz, “Voltage sensitivity based site selection for PHEV charging station in commercial distribution system,” in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2013.
- [67] M. Etezadi-Amoli, K. Choma, and J. Stefani, “Rapid-charge electric-vehicle stations,” *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 25, no. 3, pp. 1883–1887, 2010.
- [68] K. T. Fang, R. Li, and A. Sudjianto, *Design and Modeling for Computer Experiments*. 2006.
- [69] A. R. Webb, *Statistical Pattern Recognition*. 2002.
- [70] J. Dannehl, F. W. Fuchs, and P. B. Thøgersen, “PI state space current control of grid-connected PWM converters with LCL filters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010.
- [71] A. Arancibia and K. Strunz, “Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging,” in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012*, 2012.
- [72] J. Shi, Y. Tang, L. Ren, J. Li, and S. Chen, “The phasor type model of SMES,” *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 469, no. 15–20, pp. 1785–1788, 2009.