

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Representación Energética Macroscópica de un Sistema de
Alimentación Basado en Celdas de Combustible**

presentada por

Ing. Ricardo Schacht Rodríguez

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Directora de tesis
Dra. María Guadalupe López López

Codirector de tesis
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez

Cuernavaca, Morelos, México. Abril del 2015

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cuernavaca, Mor., 17/marzo/2015

OFICIO No. DIE/032/2015
Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

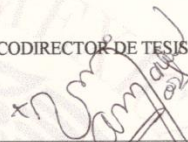
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Ricardo Schacht Rodríguez**, con número de control **M13CE010**, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN BASADO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



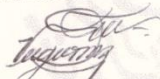
Dra. Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 7980045

CODIRECTOR DE TESIS



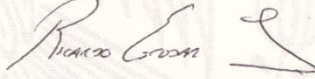
Dr. Victor Manuel Alvarado Martínez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 8031070

REVISOR 1



Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 3431842

REVISOR 2



Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7534115

C. p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

CMAZ/lrr

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cuernavaca, Mor., 24 de marzo de 2015
OFICIO No. SAC/107/2015

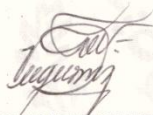
Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. RICARDO SCHACHT RODRÍGUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Representación Energética Macroscópica de un Sistema de Alimentación Basado en Celdas de Combustible**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO"



DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Dedicatorías

*A Dios por ser mi guía y fortaleza en cada una de las etapas
de mi vida.*

*A mis padres Engona Persy y Margarita por creer siempre en
mí y nunca dejarme solo.*

*A mi hermano Percy por enseñarme el valor y la grandeza de
la vida.*

*A Nabila por su apoyo incondicional y por llegar a mi vida
justo en el momento correcto.*

Agradecimientos

A mis padres Engona Persy y Margarita por su amor, apoyo, paciencia, comprensión y sobre todo por creer siempre en mí. Este trabajo es fruto de todos sus esfuerzos.

A mis abuelos Porfirio y Ninfa por darme siempre buenos consejos y tenerme presente en sus oraciones.

A mi hermano Percy, por mostrarme la grandeza y el verdadero significado de la vida.

A Nabila, el gran amor de mi vida, por amarme, apoyarme y tener fe en mí.

A la familia Márquez Gómez por su apoyo en esta etapa de mi vida.

A mis asesores, la Dra. Guadalupe y el Dr. Víctor por su apoyo y confianza depositada en mí para el desarrollo de esta tesis.

A mis revisores el Dr. Fabricio y el Dr. Guerrero por su accesibilidad y comentarios en la revisión de esta tesis.

A mi amiga Adriana por su amistad y apoyo en esta travesía.

A mis amigos Cinda, Juan Esteban y Abraham Leiva por su amistad, apoyo y consejos en el desarrollo de mi trabajo de tesis.

Al grupo de "Celdas de Combustible" por sus comentarios y retroalimentación.

A mis amigos Alberto Vidal, Jashiel, Marcos Alfredo, Moisés, Juan Carlos, Valdivia, Leonardo Orozco, Leonardo Daniel, Audomaro, Carbot, Jesse, Alan, Gerardo Ortiz, Mael, Omar Arellano, Julio Ayala, Rita, Susana, María del Carmen, así como también a los amigos de otras generaciones por sus ánimos, apoyo, consejos y por hacer agradable mi estancia en el CENIDET.

A los profesores del área de electrónica quienes me formaron académicamente en el área de control.

AL CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Representación Energética Macroscópica de un Sistema de Alimentación Basado en Celdas de Combustible

Resumen

Un sistema de alimentación híbrido: celda de combustible-supercapacitor, se compone de tres elementos:

- Fuente primaria de energía: Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM).
- Fuente secundaria de energía o almacenador: Supercapacitor.
- Elementos de conexión y adecuación de señal: Convertidores estáticos de voltaje.

Estos tres elementos al operar en conjunto forman una fuente de energía capaz de satisfacer las diferentes necesidades que requiera una carga a alimentar (aplicación móvil o estacionaria). El siguiente trabajo de investigación aborda la problemática de integrar en un ambiente de simulación la dinámica de los tres dispositivos anteriores, a través de la **Representación Energética Macroscópica (REM)**. Esta metodología de modelado con enfoque energético presenta el modelo de un sistema en elementos de generación, conversión, acumulación y distribución de energía a través de variables de acción y de reacción. Permitiendo así conocer los flujos de energía que el sistema posee.

Al mismo tiempo, este enfoque de modelado propone una estrategia de control denominado **Control por Modelo Inverso**. Con esta, se desarrolla una estrategia de administración de carga que permite distribuir la carga entre la celda de combustible y el supercapacitor.

Los modelos de celda de combustible y de supercapacitor empleados en esta investigación fueron validados con datos experimentales. En el caso del modelo de celda de se utilizaron datos registrados de un sistema experimental denominado *Bahia* marca *Helion*. Para la caracterización y validación del modelo de supercapacitor se empleó un banco de supercapacitores marca *MAXWELL*®. Ambos equipos se encuentran en el *École Nationale d'Arts et Métiers (ENSAM)*.

Energetic Macroscopic Representation of Power System Based in Fuel Cell

Abstract

A hybrid power supply system: Fuel Cell-Supercapacitor is composed of three elements:

- Primary source of energy: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC).
- Secondary power supply or buffer: Supercapacitor.
- Connection and signal adaptation: static voltage converters.

These three elements to operate together form a power supply capable of meeting the different needs that require a charge to feed (mobile or stationary application). The following research work addresses the problem of integrating in an environment of dynamic simulation the three previous devices through Energy Macroscopic Representation (EMR). This modeling methodology with energy approach presents a model of a system elements: generation, conversion, storage and distribution of energy through variables of action and reaction. Allowing know the flows of energy that the system has.

At the same time, this modeling approach proposes a control strategy called Inverse Model Control. With this, a strategy for load management that allows the system to operate properly both the fuel cell and the supercapacitor is develop.

The fuel cell and supercapacitor model used in this reasearch were validated with experimental data. In the fuel cell model, date recorder in an experimental system called Bahia trademark *Helion* were used. In the characterization and validation of the supercapacitor model a bank of supercapacitors trademark Maxwell® was used. Both device are located in the *École Nationale d'Arts et Métiers (ENSAM)*.

Índice General

ÍNDICE GENERAL	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	VII
1. CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL TEMA DE TESIS	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICO	6
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	6
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	7
1.6 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	11
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	13
2.1 CELDA DE COMBUSTIBLE DE ELECTROLITO POLIMÉRICO.....	13
2.1.1 <i>Funcionamiento de una celda de combustible</i>	13
2.1.2 <i>Estructura de una celda de combustible de intercambio protónico</i>	14
2.1.3 <i>Sistema de alimentación basado en celdas de combustible</i>	16
2.2 SUPERCAPACITORES.....	17
2.2.1 <i>Propiedades físicas de los Supercapacitores</i>	17
2.2.2 <i>Construcción de un supercapacitor</i>	18
2.3 CONVERTIDORES DE POTENCIA CC-CC	19
2.4 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA.....	21
2.4.1 <i>Sistema</i>	21
2.4.2 <i>Elementos de un sistema</i>	21
2.4.2.1 Elementos tipo fuente.....	22
2.4.2.2 Elemento de acumulación de energía	22
2.4.2.3 Elementos de conversión de energía	23
2.4.2.4 Elementos de acoplamiento.....	23
2.4.3 <i>Variables generalizadas</i>	24
2.4.3.1 Asociación de variables en la REM. Principio de acción reacción.....	24
2.4.3.2 Principio de causalidad.....	25
2.4.4 <i>Reglas de asociación de elementos en la REM</i>	26
2.4.4.1 Regla de asociación directa	26
2.4.4.2 Regla de concatenación	28
2.4.4.3 Regla de permutación	30
2.4.5 ESTRATEGIA DE CONTROL POR MODELO INVERSO	32
3. CAPÍTULO III. MODELO DE CELDA DE COMBUSTIBLE Y SUPERCAPACITOR	37
3.1 MODELO DE CELDA DE COMBUSTIBLE. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA EXPERIMENTAL <i>BAHIA</i>	38
3.1.1 <i>Datos experimentales</i>	40
3.1.2 <i>Modelo matemático de apilamiento de celdas de combustible</i>	41
3.1.2.1 Modelo eléctrico en estado estacionario	41
3.1.2.2 Modelo dinámico	46
3.1.3 <i>Modelo de suministro de reactantes</i>	51
3.1.3.1 Colector de Suministro	51

3.1.3.2	Colector de escape	52
3.1.3.3	Presión en el cátodo y ánodo del apilamiento	52
3.1.4	<i>Representación Energética Macroscópica de modelo transitorio de celda Bahia</i>	54
3.2	MODELO MATEMÁTICO DE SUPERCAPACITOR. CASO DE ESTUDIO: BANCO DE SUPERCAPACITORES MAXWELL®	55
3.2.1	<i>Banco de supercapacitores Maxwell®</i>	55
3.2.2	<i>Modelo matemático de supercapacitor</i>	55
3.2.3	<i>Representación energética macroscópica del modelo por circuito equivalente de supercapacitor</i>	56
3.3	SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE CELDA DE COMBUSTIBLE-SUPERCAPACITOR Y VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES	57
3.3.1	<i>Validación del modelo de celda de combustible</i>	57
3.3.2	<i>Validación del modelo de supercapacitor</i>	62
4.	CAPITULO IV. CONEXIÓN DE CELDA DE COMBUSTIBLE Y SUPERCAPACITOR CON CONVERTIDORES.....	65
4.1	TOPOLOGÍA DE CONEXIÓN	65
4.1.1	<i>Modelo matemático de convertidores a través de la REM</i>	65
5.	CAPÍTULO V. CONTROL DE SISTEMA HÍBRIDO	75
5.1	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN HÍBRIDO.....	75
5.1.1	<i>Lazo de control del convertidor asociado a la celda de combustible</i>	76
5.1.2	<i>Estrategia de administración de carga</i>	79
5.1.3	<i>Resultados de implementación en simulación</i>	86
6.	CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	97
6.1	CONCLUSIONES.....	97
6.1.1	<i>Modelo matemático de celda de combustible Bahia</i>	97
6.1.2	<i>Modelo matemático de Supercapacitor</i>	97
6.1.3	<i>Modelo matemático de convertidores</i>	97
6.1.4	<i>Estrategia de control por modelo inverso</i>	98
6.2	TRABAJOS FUTUROS.....	98
	REFERENCIAS	99
7.	ANEXOS	103
	ANEXO I. MODELADO DE ELEMENTOS USANDO LA REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA	103
	ANEXO II. IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS EN MATLAB®	108
	ANEXO III. PARÁMETROS DE SUPERCAPACITOR	112
	ANEXO IV: DINÁMICA FLUÍDICA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	113

Índice de Figuras

Capítulo I. Generalidades del tema de tesis

<i>Figura 1.1</i> Descripción simplificada del sistema de celda de combustible en REM desarrollado en el trabajo de Chrenko [17].	8
<i>Figura 1.2</i> Modelo REM de celda de combustible [18].	8
<i>Figura 1.3</i> Modelo REM de supercapacitor [18].	9
<i>Figura 1.4</i> REM de acoplamiento celda de combustible-supercapacitor y estrategia de control [18].	9
<i>Figura 1.5</i> REM de sistema híbrido [20].	10
<i>Figura 1.6</i> Modelo por circuito equivalente de supercapacitor de Zubieta y Bonert [19].	10
<i>Figura 2.1</i> Monocelda de combustible (propiedad del Laboratorio de Celdas de la GENC-IIE, Autor Zamora-Escobedo [6])	13

Capítulo II. Marco Teórico

<i>Figura 2.2</i> Diagrama de bloques de celda de combustible PEM.	14
<i>Figura 2.3</i> Esquema de celda de combustible tipo PEM.	15
<i>Figura 2.4</i> Capas que integran a una celda de combustible PEM.	15
<i>Figura 2.5</i> Conexión de celdas de combustible en serie para generar apilamiento.	15
<i>Figura 2.6</i> Apilamiento de celdas de combustible de 1kW, marca Horizon (propiedad del CENIDET).	15
<i>Figura 2.7</i> Diagrama de bloques de un sistema de celda de combustible [6].	16
<i>Figura 2.8</i> Capas que forman un supercapacitor [3].	18
<i>Figura 2.9</i> Clasificación de elementos que componen a un sistema.	22
<i>Figura 2.10</i> Representación de fuente de energía.	22
<i>Figura 2.11</i> Representación de elemento de acumulación.	23
<i>Figura 2.12</i> Representación de elementos de conversión de energía. (a) Monofísico. (b) Multifísico.	23
<i>Figura 2.13</i> Representación de elementos de acoplamiento y/o distribución de energía. (a) Acoplamiento monofísico. (b) Acoplamiento multifísico.	24
<i>Figura 2.14</i> Representación de variables de acción-reacción.	25
<i>Figura 2.15</i> Representación de principio de causalidad integral en un inductor.	26
<i>Figura 2.16</i> Circuito RC. Ejemplo de regla de asociación directa.	27
<i>Figura 2.17</i> REM de elementos dinámicos del circuito RC.	27
<i>Figura 2.18</i> REM de elementos de conversión de energía del circuito RC.	28
<i>Figura 2.19</i> Fuentes de energía de circuito RC.	28
<i>Figura 2.20</i> REM de circuito RC.	28
<i>Figura 2.21</i> Máquina de CC ejemplo de regla de concatenación.	29
<i>Figura 2.22</i> REM de máquina de C.C. con problema de asociación directa.	29
<i>Figura 2.23</i> Inductancia equivalente.	29
<i>Figura 2.24</i> Aplicación de regla de concatenación.	30
<i>Figura 2.25</i> Sistema de reducción.	30
<i>Figura 2.26</i> REM de sistema de reducción con problema de asociación directa.	31
<i>Figura 2.27</i> Aplicación de la regla de permutación en un sistema de engranes.	31
<i>Figura 2.28</i> Principio de inversión.	32
<i>Figura 2.29</i> REM de relación estática de entrada simple.	33
<i>Figura 2.30</i> REM de relación estática de entrada simple.	34
<i>Figura 2.31</i> REM de relación dinámica de entrada simple.	34
<i>Figura 2.32</i> Diagrama de bloques de relación dinámica de entrada simple.	35

Capítulo III. Modelo de celda de combustible y supercapacitor

<i>Figura 3.1</i> Sistema experimental Bahía.	39
<i>Figura 3.2</i> Diagrama de instrumentos del sistema Bahía.	39
<i>Figura 3.3</i> Respuesta de sistema Bahía ante escalones de corriente.	40
<i>Figura 3.4</i> Respuesta de sistema Bahía ante rampas de corriente.	40
<i>Figura 3.5</i> Respuesta de sistema Bahía ante ciclo NEDC de corriente.	41

Figura 3.6	<i>Curva de polarización de una celda de combustible con las diferentes zonas o caídas de voltaje.</i>	43
Figura 3.7	<i>Curva de polarización de celda de combustible Bahía.</i>	43
Figura 3.8	<i>Comparación de curva de polarización experimental con modelo en estado estable.</i>	45
Figura 3.9	<i>Demanda de corriente (a) y efecto de la capacitancia de doble capa y sobretiro negativo (b).</i>	46
Figura 3.10	<i>Respuesta en voltaje de celda Bahía ante demanda de corriente.</i>	46
Figura 3.11	<i>Diagrama esquemático de una celda de combustible PEM.</i>	47
Figura 3.12	<i>Circuito equivalente para obtener el modelo dinámico [6].</i>	48
Figura 3.13	<i>Circuito equivalente de respuesta eléctrica del sistema Bahía.</i>	49
Figura 3.14	<i>Subsistema de suministro de reactantes [9].</i>	51
Figura 3.15	<i>Diagrama de bloques del modelo de celda de combustible Bahía.</i>	53
Figura 3.16	<i>Banco de supercapacitores Maxwell®.</i>	55
Figura 3.17	<i>Simplificación del modelo de Supercapacitor.</i>	56
Figura 3.18	<i>REM de modelo de supercapacitor.</i>	57
Figura 3.19	<i>Escalones de corriente.</i>	58
Figura 3.20	<i>Respuesta del modelo REM y datos experimentales.</i>	58
Figura 3.21	<i>Error entre el modelo REM y los datos experimentales.</i>	58
Figura 3.22	<i>Respuesta del modelo REM comparación con datos experimentales.</i>	58
Figura 3.23	<i>Error entre el modelo CE y los datos experimentales.</i>	59
Figura 3.24	<i>Rampas de Corriente.</i>	59
Figura 3.25	<i>Respuesta del modelo REM y datos experimentales.</i>	59
Figura 3.26	<i>Error entre el modelo REM y los datos experimentales.</i>	59
Figura 3.27	<i>Respuesta del modelo CE y datos experimentales.</i>	60
Figura 3.28	<i>Error entre el modelo CE y los datos experimentales.</i>	60
Figura 3.29	<i>Ciclo de conducción NEDC.</i>	60
Figura 3.30	<i>Respuesta del modelo REM y datos experimentales.</i>	60
Figura 3.31	<i>Error entre modelo REM y datos experimentales.</i>	61
Figura 3.32	<i>Respuesta del modelo CE y datos experimentales.</i>	61
Figura 3.33	<i>Error entre modelo CE y datos experimentales.</i>	61
Figura 3.34	<i>Corriente de carga aplicada al supercapacitor.</i>	62
Figura 3.35	<i>Comparación de voltaje modelo REM y experimental (ciclo de carga).</i>	62
Figura 3.36	<i>Error entre el respuesta de modelo REM y datos experimentales (ciclo de carga).</i>	62
Figura 3.37	<i>Comparación de voltaje modelo CE y experimental (ciclo de carga).</i>	63
Figura 3.38	<i>Error entre el respuesta de modelo CE y datos experimentales (ciclo de carga).</i>	63
Figura 3.39	<i>Corriente de descarga aplicada al supercapacitor.</i>	63
Figura 3.40	<i>Comparación de voltaje modelo REM y experimental (ciclo de descarga).</i>	63
Figura 3.41	<i>Error entre el respuesta de modelo REM y datos experimentales (ciclo de descarga).</i>	64
Figura 3.42	<i>Comparación de voltaje modelo CE y experimental (ciclo de descarga).</i>	64
Figura 3.43	<i>Error entre el respuesta de modelo CE y datos experimentales (ciclo de descarga).</i>	64

Capítulo IV. Conexión de celda de combustible y supercapacitor con convertidores

Figura 4.1	<i>Esquema de sistema de alimentación híbrido basado en celdas de combustible [20].</i>	65
Figura 4.2	<i>Punto máximo de operación de celda de combustible.</i>	66
Figura 4.3	<i>Convertidor elevador (a). REM de convertidor elevador (b).</i>	68
Figura 4.4	<i>Comparación de respuesta de convertidor elevador en modelo promediado y modelo REM.</i>	69
Figura 4.5	<i>REM de celda de combustible con convertidor elevador.</i>	70
Figura 4.6	<i>Respuesta en lazo abierto de celda de combustible y convertidor.</i>	70
Figura 4.7	<i>REM de sistema híbrido.</i>	71
Figura 4.8	<i>Respuesta del sistema híbrido en lazo abierto.</i>	73

Capítulo V. Control de sistema híbrido

Figura 5.1	<i>Estructura de sistema híbrido.</i>	75
Figura 5.2	<i>Variables a invertir en el convertidor asociado a la celda de combustible.</i>	76
Figura 5.3	<i>Diagrama de bloques de control del convertidor de calda de combustible.</i>	77
Figura 5.4	<i>Implementación de estrategia de control por modelo inverso al conjunto celda-convertidor.</i>	78

Figura 5.5 Respuesta de celda-convertidor con control inverso.....	78
Figura 5.6 Respuesta en potencia y ciclo de trabajo del convertidor.....	79
Figura 5.7 Estrategia de administración de energía.....	80
Figura 5.8 Análisis frecuencial: (a) datos de la celda de combustible, (b) espectro en frecuencias.....	80
Figura 5.9 Diagrama de bode del filtro pasabajas.....	81
Figura 5.10 Porcentaje de división frecuencial de la carga.....	82
Figura 5.11 Bloque de estrategia de control para administración de la carga.....	82
Figura 5.12 Variables a invertir en el sistema híbrido: control local.....	83
Figura 5.13 Diagrama de bloques de sistema híbrido.....	84
Figura 5.14 REM de sistema híbrido.....	85
Figura 5.15 Perfil de carga (1): Tren de escalones.....	86
Figura 5.16 Perfil de carga (2): Ciclo NEDC.....	86
Figura 5.17 Perfil de carga (3): Demanda aleatoria de potencia.....	86
Figura 5.18 Respuesta de la celda de combustible (perfil de potencia 1).....	87
Figura 5.19 Respuesta del supercapacitor (perfil de potencia 1).....	87
Figura 5.20 Respuesta del sistema híbrido (perfil de potencia 1).....	88
Figura 5.21 Consumo de reactantes (perfil de potencia 1).....	88
Figura 5.22 Ciclos de trabajo de convertidores (perfil de potencia 1).....	89
Figura 5.23 Respuesta de celda de combustible (perfil de potencia 2).....	90
Figura 5.24 Respuesta del supercapacitor (perfil de potencia 2).....	90
Figura 5.25 Respuesta de sistema híbrido (perfil de potencia 2).....	91
Figura 5.26 Consumo de reactantes (perfil de potencia 2).....	91
Figura 5.27 Ciclo de trabajo de convertidores (perfil de potencia 2).....	92
Figura 5.28 Respuesta de celda de combustible (perfil de potencia 3).....	93
Figura 5.29 Respuesta del supercapacitor (perfil de potencia 3).....	93
Figura 5.30 Respuesta del sistema híbrido (perfil de potencia 3).....	94
Figura 5.31 Consumo de reactantes (perfil de potencia 3).....	94
Figura 5.32 Ciclo de trabajo de los convertidores (perfil de potencia 3).....	95

Anexos

Figura A.7.1 Implementación de circuito equivalente por componentes de celda de combustible en Matlab®.....	108
Figura A.7.2 Implementación de circuito equivalente por componentes de supercapacitor en Matlab®.....	108
Figura A.7.3 Librería REM.....	109
Figura A.7.4 Implementación de modelo REM.....	109
Figura A.7.5 Implementación de modelo REM.....	109
Figura A.7.6 Implementación de celda de combustible-convertidor y control.....	110
Figura A.7.7 Implementación de celda de combustible-convertidor y control.....	111
Figura A.7.8 Respuesta fluidica del modelo REM de pruebas de escalones de corriente.....	113
Figura A.7.9 Respuesta fluidica del modelo REM de pruebas de rampas de corriente.....	114
Figura A.7.10 Respuesta fluidica de modelo REM de ciclo NEDC.....	114

Índice de tablas

Tabla 2.1 Topología de convertidores de potencia de CC.....	19
Tabla 2.2 Relación de las variables de acción – reacción con diferentes tipos de sistemas.....	25
Tabla 3.1 Modelo en estado estable.....	44
Tabla 3.2 Modelo transitorio de celda Bahía.....	49
Tabla 3.3 Parámetros del modelo en circuito equivalente.....	56
Tabla 4.1 Ecuaciones del convertidor elevador y su REM.....	68
Tabla 4.2 Ecuaciones del sistema híbrido y su REM.....	72
Tabla 5.1 Parámetros del controlador PID.....	77
Tabla A.7.1 Relación de los elementos que constituyen a los sistemas y su representación en REM.....	103
Tabla A.7.2 Especificaciones eléctricas.....	112
Tabla A.7.3 Especificaciones de temperatura.....	112
Tabla A.7.4 Especificaciones de energía y potencia.....	112

Lista de símbolos y abreviaturas

α	Coefficiente de transferencia de carga.
A	Área activa de la celda.
$A_{T,rm}$	Área transversal de colector de escape.
B_1	Parámetro de ajuste de resistencia óhmica.
B_2	Parámetro de ajuste de capacitancia de doble capa.
C_{dl}	Capacitancia de doble capa.
C_{dd}	Capacitancia asociada al convertidor elevador.
$C_{D,rm}$	Coefficiente de descarga.
C_{i0}	Capacitancia asociada al modelo de supercapacitor.
C_{i1}	Capacitancia asociada al modelo de supercapacitor.
C_{dd}	Capacitor de convertidor elevador.
C_u	Capacitor asociado al sobretiro negativo.
D_{cc}	Ciclo de trabajo de convertidor de celda de combustible.
D_{sc}	Ciclo de trabajo de convertidor de supercapacitor.
E^0	Voltaje teórico de celda de combustible.
F	Constante de Faraday.
F_l	Flujo de aire alimentado.
f_s	Frecuencia de conmutación.
f_c	Frecuencia de corte de filtro <i>pasabajas</i> .
I_{BUS}	Corriente de salida de sistema híbrido.
I_{cc}	Corriente en la celda de combustible.
$I_{cc\ ref}$	Corriente en la celda de combustible de referencia.
$I_{cc\ med}$	Corriente en la celda de combustible medida.
I_{couple}	Corriente de acoplamiento.
I_{IGBT}	Corriente en el IGBT
I_{Ldd}	Corriente en el inductor
I_{sup}	Corriente en el supercapacitor.
j	Densidad de corriente
j_n	Densidad de corriente interna
j_o	Densidad de corriente de intercambio.
k_{sm}	Coefficiente de descarga

l	Grosor de la membrana
L_{dd}	Inductancia asociada al diseño del convertidor elevador.
L_u	Inductancia asociada al sobretiro negativo.
λ	Factor Estequiométrico.
MEA	Ensamble membrana electrodo.
N_{cel}	Numero de celdas en el apilamiento.
P_{an}	Presión en el ánodo del apilamiento.
P_{atm}	Presión atmosférica
P_{ca}	Presión el cátodo del apilamiento.
P_{fc}	Potencial del apilamiento de celdas.
P_{rm}	Presión en el colector de retorno.
P_{sm}	Presión en el colector de suministro.
REM	Representación Energética Macroscópica
ρ_m	Resistencia protónica de la membrana.
R	Constante de los gases ideales.
R_i	Resistencia asociada al modelo del supercapacitor.
R_d	Resistencia asociada al sobrepotencial de activación
R_T	Resistencia total de la celda.
R_u	Resistencia asociada al sobretiro negativo.
σ_m	Conductividad protónica de la membrana.
T_{fc}	Temperatura de la celda de combustible.
T	Constante de tiempo de filtro <i>pasabajas</i> .
u_{tun}	Entrada ajustada.
u_1	Entrada del sistema.
u_{2mes}	Entrada medida
V_{Act}	Voltaje de activación
V_{BUS}	Voltaje en el bus.
V_{ca}	Volumen en el cátodo.
V_{fc}	Voltaje de celda de combustible.
V_{dl}	Voltaje asociado a la capacitancia de doble capa.
v_{ddin}	Voltaje de entrada del convertidor.
v_{ddout}	Voltaje de salida del convertidor.
V_{Ri}	Voltaje en la resistencia del supercapacitor.
V_{IGBT}	Voltaje en el IGBT.
V_{Nernst}	Voltaje de Nernst
V_{Ohm}	Voltaje óhmico.
$W_{ca,out}$	Flujo de salida del cátodo.
$W_{H2 in}$	Flujo de hidrógeno de entrada.
$W_{H2 react}$	Flujo de hidrógeno consumido.
W_{in}	Flujo de entrada
W_{out}	Flujo de salida.
$W_{O2 in}$	Flujo de oxígeno de entrada
W_{O2out}	Flujo de oxígeno de salida
$W_{O2 react}$	Flujo de oxígeno consumido
$W_{rm,out}$	Flujo del colector de retorno
$W_{sm,out}$	Flujo del colector de suministro
y_{mes}	Salida medida.
y_{ref}	Salida de referencia.
z	Numero de electrones en la reacción.

Capítulo I. Generalidades del tema de tesis

Una celda de combustible es un dispositivo que convierte la energía química de un combustible (hidrógeno) en energía eléctrica de corriente continua. Se utiliza en aplicaciones domésticas, comerciales e industriales, dependiendo de la potencia suministrada.

En la actualidad existen diferentes tipos de celdas de combustible. Su clasificación depende del nivel de potencia generado, del combustible empleado y del material usado como electrolito. En esta investigación se tienen como caso de estudio las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés). Éstas se utilizan en aplicaciones tanto estacionarias como móviles, suministrando una potencia entre 1kW y 100kW [1]. Emplean hidrógeno como combustible y utilizan como electrolito una membrana polimérica tratada, la cual da su nombre a este tipo de celda.

El estudio de estos dispositivos ha permitido desarrollar modelos matemáticos capaces de describir de forma precisa su dinámica, que ayudan a determinar rangos y modos de operación adecuados. Los modelos basados en principios de celdas de combustible tipo PEM se centran en la representación de los mecanismos y fenómenos que ocurren en el interior de la misma.

Un sistema de celda de combustible posee dispositivos o subsistemas auxiliares para mantener al sistema en los rangos de operación deseados. Tales dispositivos pueden ser un compresor o soplador para el suministro del aire, un humidificador, intercambiadores de calor para el enfriamiento de la celda y de los gases, y convertidores de potencia para entregar un voltaje en un valor normalizado [2].

Por otro lado, para que la energía que suministra un sistema de celdas de combustible sea útil y operable, es necesaria la conexión de un sistema de adecuación de potencia. Un sistema híbrido tiene además, elementos secundarios de almacenamiento.

Un sistema de alimentación híbrido basado en celdas de combustible está compuesto por un dispositivo primario que suministra la mayor parte de energía eléctrica requerida por una carga (celda de combustible) y un dispositivo secundario de almacenamiento y respaldo, que puede ser un banco de baterías o de supercapacitores. Uno de los propósitos de la hibridación de un sistema de alimentación es asegurar un suministro de energía continuo y capaz de satisfacer las necesidades de potencia de una carga específica y variable, con picos de demanda.

Las principales ventajas de los sistemas híbridos son su densidad de potencia y su capacidad para adaptarse a diferentes ciclos de demanda de energía, es decir responden a las demandas de energía en estado estable o transitorio de una aplicación. La fuente de energía primaria puede ser un motor de combustión interna o una celda de combustible, etc. El objetivo en estos casos es compartir las funcionalidades: la fuente de suministro principal satisface las

necesidades de energía del sistema, mientras que la fuente secundaria proporciona la energía que el suministro principal no sea capaz de proveer [3]. En el presente trabajo, la fuente principal es una celda de combustible y la fuente secundaria es un supercapacitor.

La complejidad del modelado de cada una de las partes de un sistema completo de alimentación híbrida depende de los elementos que se consideren y de los fenómenos y mecanismos físicos que se cuantifiquen. Algunos métodos para modelar sistemas dinámicos multidisciplinares (en los cuales se manejan diferentes formas de energía) son los modelos energéticos basados en el uso de representaciones gráficas. La Representación Energética Macroscópica (REM por sus siglas en español; EMR en inglés) por ejemplo, es un método gráfico que representa las conversiones e intercambios de energía que se llevan a cabo en los sistemas [4].

La aplicación de este tipo de modelado en sistemas de alimentación híbridos permite representar de manera simple y generalizada en términos de variables de energía y potencia los fenómenos que se llevan a cabo durante el proceso de generación de energía eléctrica.

Con la presente investigación, se desarrolló el simulador de un sistema de alimentación híbrido basado en celdas de combustibles usando la REM. El simulador incluye un modelo semi-analítico de celda de combustible combinado con un circuito equivalente. Este modelo fue validado a partir de datos experimentales registrados de una celda *Bahia* (marca *Helion*) de 1.2 kW. Así mismo se incluye un modelo de supercapacitor también en circuito equivalente, validado con datos experimentales obtenidos de un banco de supercapacitores marca Maxwell®. Ambos equipos se encuentran en la *École Nationale d'Arts et Métiers (ENSAM)*. Se consideró que la conexión de estos dispositivos se hace a través de convertidores de potencia. Los convertidores fueron modelados como ideales, es decir no se consideran pérdidas por conmutación en los elementos que los integran como el caso de inductores y capacitores.

El simulador del sistema de alimentación híbrido incluye una estrategia de control, sencilla, pero útil para la administración de carga entre la celda de combustible y el supercapacitor, siendo este el control global del sistema. Dentro de este, se tienen dos lazos de control encargados de controlar el ciclo de trabajo de los convertidores asociados a la celda de combustible y al supercapacitor. En el modelo de celda de combustible, las condiciones de operación se consideran controladas de forma ideal, como la temperatura de operación que toma valores constantes, la humedad relativa de los reactantes con un valor del 80 % y la presión del oxígeno y del hidrógeno que presenta pequeñas variaciones alrededor de 1.1 atm para el oxígeno y 1.3 atm para el hidrógeno.

1.1 Definición del problema

El problema principal que aborda este tema de tesis es desarrollar el modelo de un sistema de alimentación híbrido basado en celdas de combustible, de 1 kW de potencia, empleando el método de modelado por REM; el cual permite desarrollar modelos de sistemas donde se llevan a cabo múltiples intercambios y conversiones de energía. Se requiere que el modelo satisfaga los siguientes criterios:

- Que su uso sea apropiado para predecir el comportamiento de una celda de combustible tipo PEM en estado estable y dinámico.
- Que facilite la representación de las características y fenómenos que ocurren en un sistema de alimentación híbrido de celdas de combustible. Además, debes ser posible integrar modelos básicos de convertidores de potencia y de fuentes secundarias de alimentación a una carga fija (como baterías o supercapacitores).
- Que permita desarrollar una estructura de control para lograr un manejo eficiente de la energía a través de un buen aprovechamiento de los combustibles empleados.

Posteriormente se aborda el problema de simulación y control del sistema híbrido, este último debe ser capaz de gestionar la energía producida por la celda de combustible y por el supercapacitor con el fin de satisfacer los perfiles de carga del ciclo de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*). Este ciclo representa las demandas de potencia que requiere un auto eléctrico, escaladas para un sistema de 1 kW. La simulación se realizó mediante la librería REM de Matlab® 2013.

Como uno de los alcances del trabajo se busca determinar la viabilidad de la REM como herramienta de modelado y diseño de estructuras de control,

1.2 Antecedentes

Las tesis desarrolladas en el *cenidet* (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico) que anteceden a esta investigación, abordaron los siguientes temas:

Modelado empírico y semi-analítico de monoceldas y apilamientos de celdas de combustible tipo PEM:

- **Morales** [5]. Es un trabajo introductorio en el tema de aplicaciones y modelado de celdas de combustible.
- **Zamora y Escobedo** [6]. Desarrollaron un modelo semi-analítico y un modelo en circuito equivalente para una monocelda de combustible tipo PEM y lo extendieron al modelado de un apilamiento de N monoceldas. Tal modelo predice el comportamiento en estado estable y transitorio de celdas de combustible. Se fundamentó en principios teóricos y se complementó mediante una caracterización experimental con técnicas de medición electroquímicas.
- **Cruz Manzo** [7]. Mejoró el modelo de Zamora y Escobedo. El nuevo modelo incorpora fenómenos en el ánodo. Se hizo un análisis cualitativo, basado en mediciones experimentales sobre los problemas relacionados con el manejo del agua en la celda de combustible.

Con la experiencia en el modelado de celdas tipo PEM, se hicieron trabajos sobre modelado, simulación y control de sistemas de celdas de potencia entre 50 y 70 kW. Posteriormente, se trató el problema de modelado, control e integración de equipos auxiliares para asegurar la operación de un sistema de alimentación basado en celdas PEM.

- **Castellanos Silva** [8]. Simuló y controló un sistema de alimentación basado en celdas de combustible tipo PEM, incluyendo subsistemas de alimentación y manejo de temperatura. Se usó como base el modelo de desarrollado por Pukrushpan [9] para implementar una estrategia de control basada en un controlador multivariable con robustez ante perturbaciones. Diseñó controladores robustos por el método de *Lyapunov*.
- **Mota Cruz** [10]. Consideró los aspectos de un sistema de alimentación basado en celdas de combustible de igual manera que Silva, pero incluyendo un subsistema de generación de hidrógeno. Desarrolló una plataforma de simulación empleando *Scilab*® como software de simulación, tomó como base igualmente el modelo de Pukrushpan [9], y diseñó una estrategia de control para el suministro de combustible y oxidante del sistema. El simulador incluyó el dimensionamiento de equipos, modelado y conexión de un sistema químico para producir hidrógeno.
- **Wisther Sánchez** [11], **González-Arévalo** [12], **Cruz Rojas** [13]. En estos trabajos se abordaron problemas de modelado y control de los subsistemas de suministro de aire y manejo de temperatura de un sistema de celdas PEM, tomando como base el modelo de

Pukrushpan [9]. Su principal aportación fue mejorar el modelo de elementos auxiliares que componen el balance de planta de un sistema que opera entre 50 y 70 kW, y que habían sido considerados como ideales en el modelo de Pukrushpan; incorporando además diferentes lazos de control y haciendo uso de diferentes técnicas de control: control adaptable (por gradiente y con modelo de referencia), y control digital robusto.

- **Leyva** [14]. En este trabajo se abordó el problema de la integración de la dinámica de una celda de combustible PEM con un sistema de acondicionamiento de potencia. También se abordó el problema de la presencia del rizo de corriente de baja frecuencia en las terminales de la celda de combustible, el cual es inducido por la etapa inversora del sistema de acondicionamiento de potencia.

Para que un sistema de celdas de combustible sea completo y funcional, este requiere de dispositivos para el acondicionamiento de los niveles de voltaje y corriente, así como de fuentes secundarias para auxiliar al sistema en caso de altas demandas de voltaje y corriente debido a cambios en la carga. En este sentido, es importante considerar los problemas de integración de subsistemas con dinámicas distintas y conocer su interacción para así posteriormente establecer estrategias de control adecuadas.

1.3 Justificación

El estudio y análisis apropiados de sistemas de alimentación híbridos a través de modelos permite implementar esquemas de control capaces de gestionar la energía entre las fuentes primarias y secundarias con el fin de satisfacer los requerimientos de carga de una aplicación. Es por esto que se requiere de modelos adecuados para describir la dinámica de cada uno de los elementos que integran al sistema híbrido. La REM es una herramienta de modelado matemático que, mediante gráficos, y con un enfoque energético permite obtener un modelo simple, pero que puede contener las dinámicas y fenómenos principales que caracterizan a los sistemas representados. La REM puede ser útil para el modelado y simulación de un sistema de alimentación híbrido que tiene una celda de combustible como fuente principal, puesto que facilita el análisis de cada uno de los dispositivos que integran al sistema híbrido completo; además, esta metodología de modelado incluye bloques de control por modelo inverso que permiten diseñar controladores usando las mismas herramientas de modelado.

1.4 Objetivos general y específico

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar el modelo de un sistema de alimentación híbrido basado en celdas de combustible tipo PEM de un 1 kW, por medio de la Representación Energética Macroscópica (REM) e implementar una estrategia de control por modelo inverso.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el desempeño de una celda *Bahia* y determinar los parámetros empíricos del modelo de celdas PEM.
2. Validar el modelo REM para el apilamiento de celdas PEM.
3. Simular un subsistema básico de adecuación de potencia.
4. Simular un supercapacitor que funcione como fuente de respaldo del suministro de energía.
5. Diseñar los controladores para subsistemas de adecuación de potencia y supercapacitores.
6. Implementar una estrategia simple para la gestión de carga entre la celda de combustible y el supercapacitor.

1.5 Estado del arte

En esta sección se hace una revisión del estado del arte orientada al modelado de celdas de combustible tipo PEM basado en la REM, y la integración de dichos modelos en sistemas de alimentación híbridos, celda de combustible-supercapacitor. Se describe el método de modelado por REM, y la técnica de control basada en el principio del modelo inverso, asociado al método de modelado por representación REM.

Los modelos REM para sistemas de celdas de combustible que han sido reportados en la literatura describen de manera simplificada el funcionamiento del sistema, usando comúnmente elementos ideales. Estos modelos incluyen las ecuaciones de los dispositivos principales que integran al sistema y describen la interacción de cada uno de los dominios físicos presentes en las celdas de combustible (eléctrico, fluido y térmico); también representan el comportamiento de algunos de los dispositivos auxiliares tales como los sistemas de enfriamiento, almacenamiento de energía, suministro de reactantes, así como convertidores de potencia que adecúan la potencia entregada, según las características de la carga.

En esta revisión, también se describe el proceso de diseño de esquemas de control mediante herramientas del método REM. Se destaca la aplicación de estos modelos en sistemas de alimentación para vehículos, y se presentan algunos estudios que incorporan elementos de almacenamiento de energía como bancos de supercapacitores.

Bouscayrol, (2003) [4] propuso el modelado de sistemas multidisciplinarios a partir de un enfoque energético. Esta propuesta de modelado es conocida como Representación Energética Macroscópica (REM). Definió las bases en las cuales se apoya la REM, los principios y leyes físicas que permiten establecer las relaciones entre los diferentes elementos de un sistema así como también las diferentes reglas que permiten la asociación de estos. La REM tuvo origen en los llamados Gráficos de Orden Causal [15], [16], los cuales se usaron para representar sistemas electromecánicos en un principio. Para completar el método de REM, se establecieron las diferentes reglas de asociación para la construcción de modelos. A diferencia del modelado con *Bond-Graph*, la REM incorpora elementos de control, por lo tanto se definieron los principios de inversión de elementos para construir estructuras de control.

Uno de los primeros trabajos sobre el tema de modelado y control de sistemas de celdas de combustible usando la REM es el de Chrenko *et al.*, (2007) [17]. En este se desarrolló un modelo simplificado de celda de combustible tipo PEM (figura 1.1) que describe el transporte de los reactantes a través del ánodo y el cátodo, y como se lleva a cabo la reacción electroquímica. Se desarrollaron controladores con la técnica del modelo inverso para el sistema de suministro de aire. La validación de su modelo se llevó a cabo comparando la respuesta del modelo con datos obtenidos en el sistema de celda de combustible *Ballard NEXA*TM. En el Anexo I se proporciona la descripción de los bloques de la REM que se usan en el modelo.

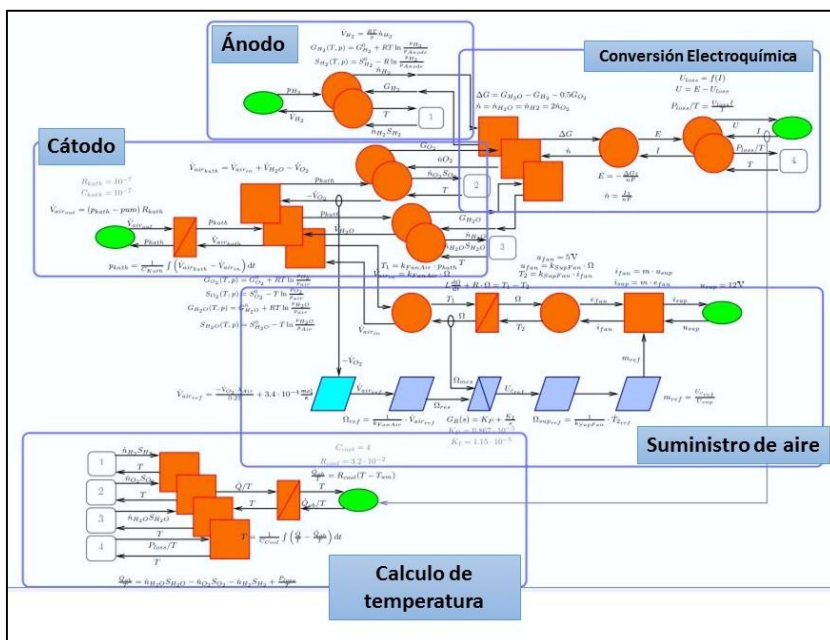


Figura 1.1 Descripción simplificada del sistema de celda de combustible en REM desarrollado en el trabajo de Chrenko [17].

Boulon *et al.*, (2007) [18], (figura 1.2), propusieron un modelo de sistema de alimentación basado en celdas de combustible a través de la REM, donde integra un banco de supercapacitores como fuente secundaria.

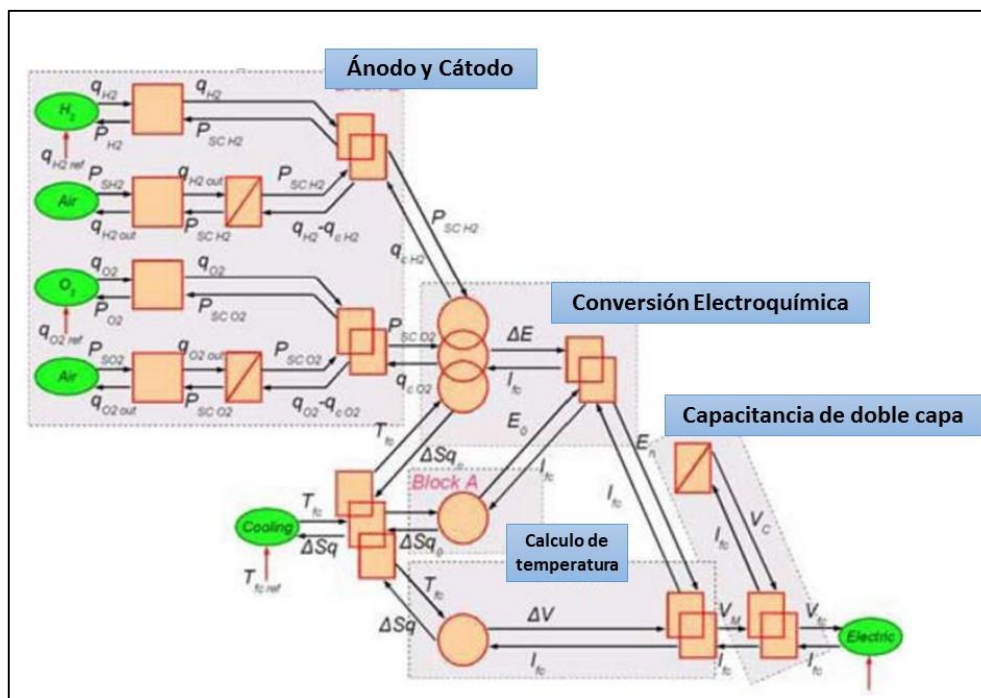


Figura 1.2 Modelo REM de celda de combustible [18].

El modelo de la celda de combustible de Boulon sólo considera la parte fluidica, electroquímica y eléctrica del sistema, representados con elementos ideales y lineales. Así mismo desarrolló el modelo en REM del supercapacitor (figura 1.3) tomando como base el modelo propuesto por Zubieta y Bonert, (2000) [19], e incluyó un sistema de enfriamiento remarcando la importancia de la generación de calor en el interior de la celda. También desarrolló el modelo de la etapa de acondicionamiento de potencia empleando la REM (figura 1.4) e integró último con el modelo de la celda de combustible y del supercapacitor. Finalmente, por medio de la técnica del modelo inverso estableció una estrategia de control para mantener el voltaje constante en la salida del sistema ante cambios abruptos en la carga. El modelo fue validado con mediciones realizadas en un apilamiento ZSW de 20 monoceldas.

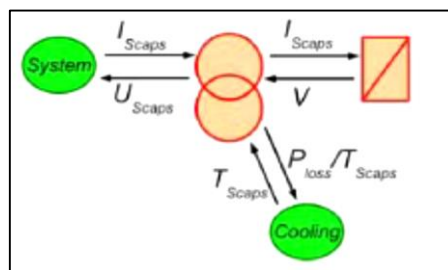


Figura 1.3 Modelo REM de supercapacitor [18].

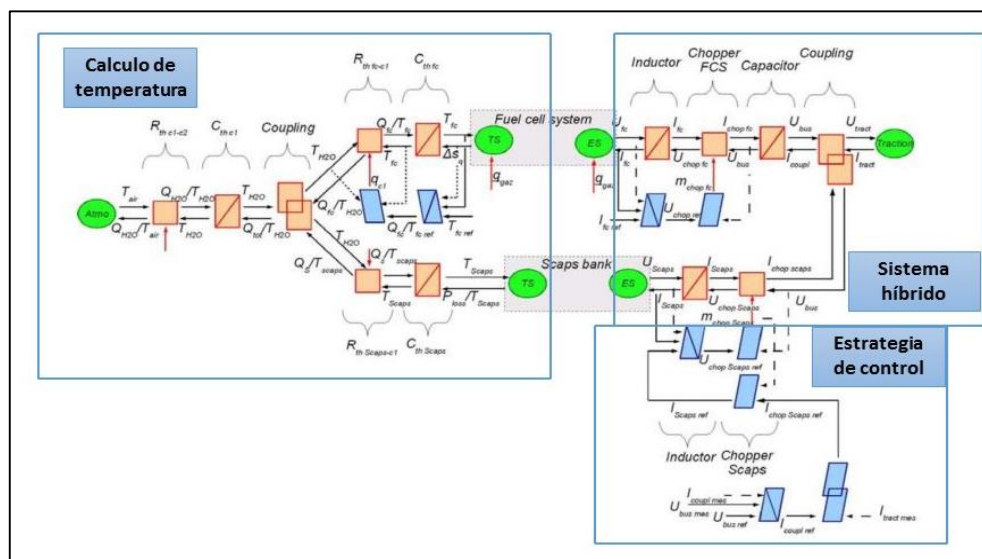


Figura 1.4 REM de acoplamiento celda de combustible-supercapacitor y estrategia de control [18].

Boulon retomó el modelo que propuso en [18] y comparó el desempeño de una celda de combustible con el de otras fuentes de energía, tales como baterías de litio, níquel y plomo así como un motor de combustión interna, desarrollando sus modelos en REM [20]. Este estudio permitió comparar la eficiencia de los sistemas de celdas de combustible con otras fuentes de energía convencionales al integrarlos en un sistema de alimentación para un vehículo híbrido. Boulon propuso otra topología de conexión entre dos fuentes de energía y una estrategia de control basada en el modelo inverso. Esta topología incluye un convertidor que adecúa los

niveles de voltaje entre la fuente principal de energía y la secundaria para satisfacer las necesidades de la carga. Esta topología sólo considera un convertidor de potencia a diferencia de la topología propuesta en [18], simplificando así el modelo del sistema híbrido.

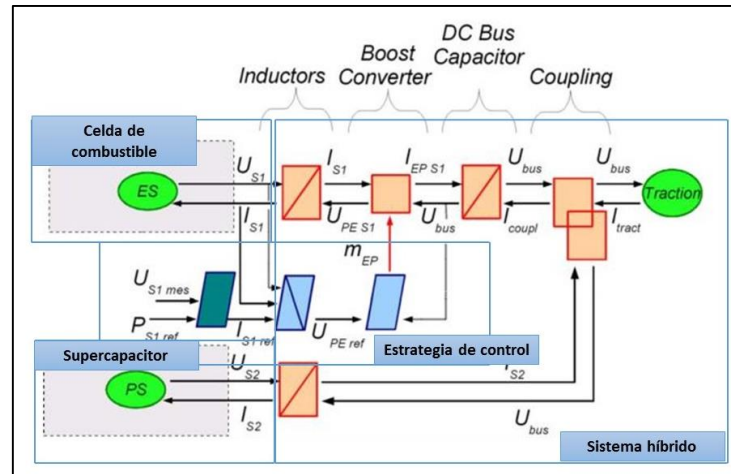


Figura 1.5 REM de sistema híbrido [20].

Las fuertes interacciones de fenómenos físicos que se llevan a cabo en un sistema de celdas de combustible hacen que el desarrollo de modelos sea complejo, pero el método de REM permite de manera simple cuantificar procesos que determinan en gran medida la operación de una celda de combustible. Algunos de los elementos o dispositivos que se pueden incluir son el sistema de suministro de aire [21], el cual permite el tratamiento de los reactantes (hidrógeno y oxígeno), el manejo del agua es uno de los temas que tiene gran relevancia en la eficiencia y vida útil de un sistema de celda de combustible. Boulon, (2012) [22] analizó el comportamiento del sistema considerando los fenómenos del agua tales como exceso de humedad en la membrana de intercambio protónico, así como una sequedad inducida en la misma y el impacto que tienen ambos fenómenos en la reacción electroquímica y por consiguiente en el voltaje generado.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, algunos trabajos incluyen la dinámica de supercapacitores usando como base el modelo en circuito equivalente desarrollado por Zubieta y Bonert, (2000) [19], (figura 1.6). Su REM se muestra en la figura (1.3).

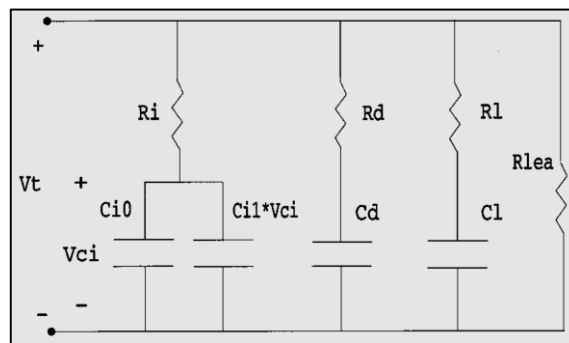


Figura 1.6 Modelo por circuito equivalente de supercapacitor de Zubieta y Bonert [19].

En los trabajos mencionados anteriormente, sólo se describen modelos de celdas de combustible y la integración de estos en sistemas de alimentación híbridos. En el caso de la estrategia de control por modelo inverso, Boulon *et al.*, (2010) [23] presentó la estructura de control denominada *Estructura de Control Máxima* para sus modelos REM de celdas de combustible.

En un modelo REM, la estrategia de control queda limitada a la técnica con modelo inverso [24], [25], [26]. Esta técnica de control se ha aplicado a sistemas de alimentación basados en celdas de combustible [27], usadas como fuente de energía para vehículos eléctricos [28], [29].

Los trabajos citados anteriormente permiten conocer el alcance de la Representación Energética Macroscópica para el modelo de sistemas de alimentación basado en celdas de combustible, así como también el desarrollo de estrategias de control basadas en modelo inverso. Estos trabajos servirán como sustento en la presente investigación.

1.6 Organización del documento

El documento de tesis está organizado de la siguiente forma:

En el capítulo I se exponen aspectos generales sobre el tema de tesis, la problemática a resolver, la justificación, los objetivos, y el estado del arte.

En el capítulo II se define el marco teórico de esta investigación, describiendo las principales características de las celdas de combustible, los supercapacitores, los convertidores de potencia y se presenta el método de modelado por Representación Energética Macroscópica.

En el capítulo III se explica el desarrollo del modelo en REM para una celda de combustible y para un banco de supercapacitores, Por otro lado, se presentan los resultados de la validación de los modelos, comparando la predicción dinámica con datos experimentales.

En el capítulo IV se presenta el simulador integrado que incluye el modelo de celda de combustible y el modelo del supercapacitor. Se realizan pruebas del modelo integrado en lazo abierto para conocer el comportamiento del sistema.

En el capítulo V se explica el desarrollo del control por modelo inverso aplicado al sistema híbrido, así como la implementación de la estrategia de administración de carga. Así mismo se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de diferentes perfiles de carga al sistema.

En el capítulo VI se dan las conclusiones y se proponen trabajos futuros para dar continuidad a la investigación realizada, con respecto a los modelos de celda de combustible, del supercapacitor, del manejo del sistema híbrido y con relación al control por modelo inverso

Capítulo II. Marco Teórico

En este capítulo se describen las características generales y el funcionamiento de los dispositivos que integran a un sistema híbrido, como son la celda de combustible, el supercapacitor y los convertidores de potencia. También se explican los fundamentos que definen a la Representación Energética Macroscópica como la metodología de modelado que es, y se dan algunos ejemplos de modelado y de control para mejor comprensión de la técnica de modelado.

2.1 Celda de combustible de electrolito polimérico

Las celdas de combustible PEM usan hidrógeno y oxígeno como combustible. Generan densidades de potencia entre 1-100 kW [2]. Poseen un electrolito polimérico que opera a una temperatura cercana a 100 °C y de esta forma tiene la ventaja iniciar su operación de forma rápida en comparación con otros tipos de celdas de combustible [1]. En la figura (2.1) se muestra como ejemplo una celda de combustible PEM, donde se observan los canales de alimentación del hidrógeno y del oxígeno. En las secciones siguientes se describen con más detalle las partes que integran este dispositivo.

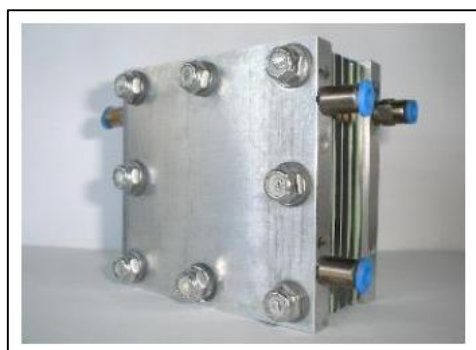


Figura 2.1 Monocelda de combustible (propiedad del Laboratorio de Celdas de la GENC-IIE, Autor Zamora-Escobedo [6])

2.1.1 Funcionamiento de una celda de combustible

La generación de energía eléctrica de una celda de combustible tipo PEM se lleva a cabo a partir de las reacciones químicas del hidrógeno y del oxígeno que ocurren dentro de ella. Esto se observa en la figura (2.2), el hidrógeno y el oxígeno ingresan a la celda de combustible por el ánodo (electrodo negativo) y por cátodo (electrodo positivo), respectivamente. El hidrógeno se oxida en el ánodo y el oxígeno se reduce en el cátodo. Los protones son transportados del ánodo al cátodo a través de la membrana polimérica y los electrones son atraídos al cátodo a través un circuito externo. En el cátodo, el oxígeno reacciona con los protones y con los electrones formando agua y calor. Tanto el cátodo como el ánodo contienen una placa catalizadora para acelerar las reacciones electroquímicas.

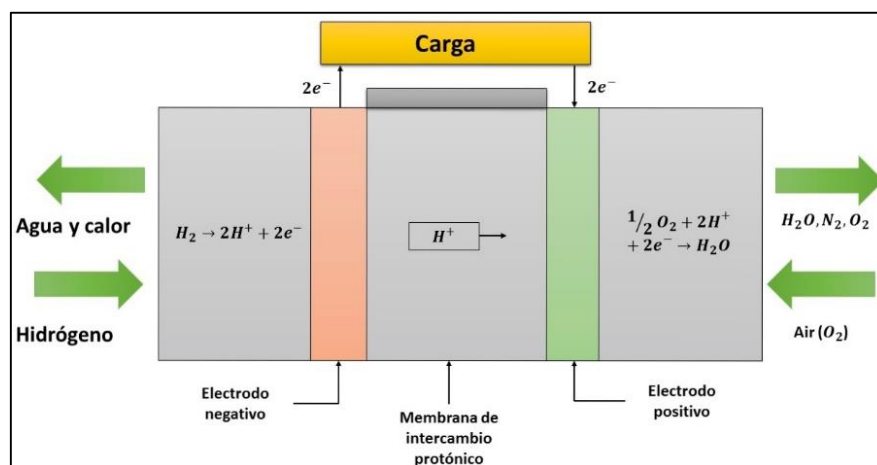


Figura 2.2 Diagrama de bloques de celda de combustible PEM.

Las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) muestran las reacciones que se llevan a cabo en el ánodo, cátodo, y el total respectivamente, en el interior de una celda PEM [2].



2.1.2 Estructura de una celda de combustible de intercambio protónico

Una celda de combustible tipo PEM se compone de las capas enlistadas a continuación. En la figura (2.3) y (2.4) se observa la unión de dichas capas para formar una celda de combustible.

- **Membrana de intercambio protónico o membrana de electrolito polimérico.** Es un polímero al cual se aplica un tratamiento químico con el fin de aumentar sus características como conductor de iones. Este tratamiento químico se realiza sulfonando el polímero. La sulfonación consiste en agregar grupos sulfónicos que permiten el intercambio de iones a través de la membrana. Las distintas empresas encargadas de la producción de membranas de electrolito de polimérico hacen uso de polímeros fluorados sulfonados, generalmente usan el fluorietileno. La membrana polimérica más conocida es el Nafion®, la cual es fabricada por *Dupont*.
- **Electrodos.** Los electrodos en una celda de combustible tipo PEM se componen de un material poroso conductor. Está recubierto con un catalizador platino (Pt) para formar la placa catalizadora, con el fin de acelerar las reacciones descritas anteriormente.

- **Ensamble membrana electrodo (MEA).** Un ensamble membrana-electrodo consiste en la unión de la membrana de electrolito polimérico con los electrodos porosos. La membrana queda contenida entre los dos electrodos (figura 2.3).
- **Placas colectoras o difusores de gas.** Son placas maquinadas (figura 2.4) que permiten la distribución de los reactantes hacia el MEA. También permiten la distribución de la corriente generada y del calor producido.

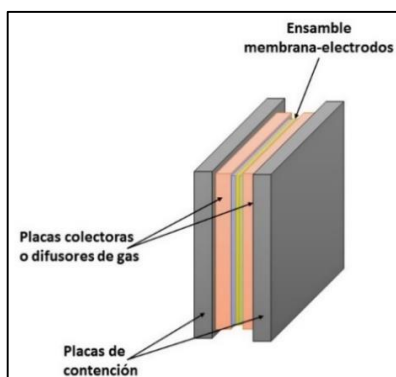


Figura 2.3 Esquema de celda de combustible tipo PEM.

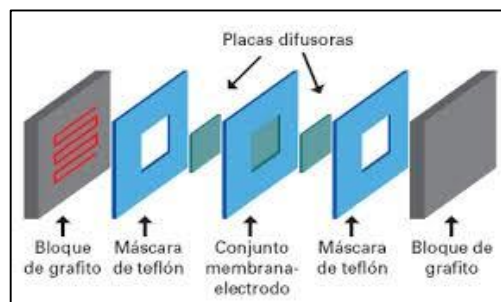


Figura 2.4 Capas que integran a una celda de combustible PEM.

El voltaje que una celda de combustible produce es pequeño; esto significa que para producir un voltaje útil muchas celdas tienen que ser conectadas en serie. La conexión de celdas de combustible en serie es conocida como apilamiento de celdas. Esta se realiza conectando el extremo de cada ánodo al cátodo de la celda siguiente a través de las placas bipolares. En la interconexión por medio de las placas bipolares, éstas tienen un canal maquinado en cada lado de su área superficial. Por un lado fluye el hidrógeno y por otro el aire u oxígeno. En la figura (2.5) se observa un ejemplo de conexión de varias celdas de combustible en serie y como son contenidas a través de placas de contención los extremos.

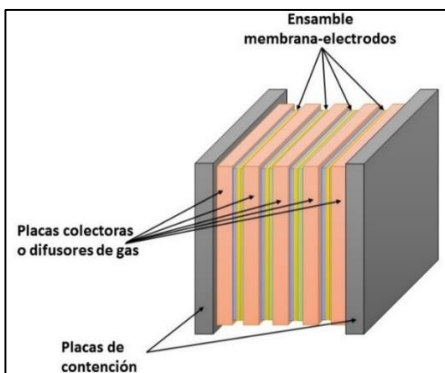


Figura 2.5 Conexión de celdas de combustible en serie para generar apilamiento.

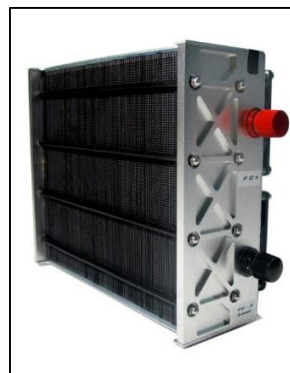


Figura 2.6 Apilamiento de celdas de combustible de 1kW, marca Horizon (propiedad del CENIDET).

2.13 Sistema de alimentación basado en celdas de combustible

Un apilamiento de celdas de combustible requiere de dispositivos auxiliares para operar adecuadamente, mantener un consumo adecuado de reactivos y obtener una respuesta en voltaje adecuada a la aplicación requerida. En la figura (2.7) se observan los subsistemas que posee un sistema de alimentación basado en celdas de combustible.

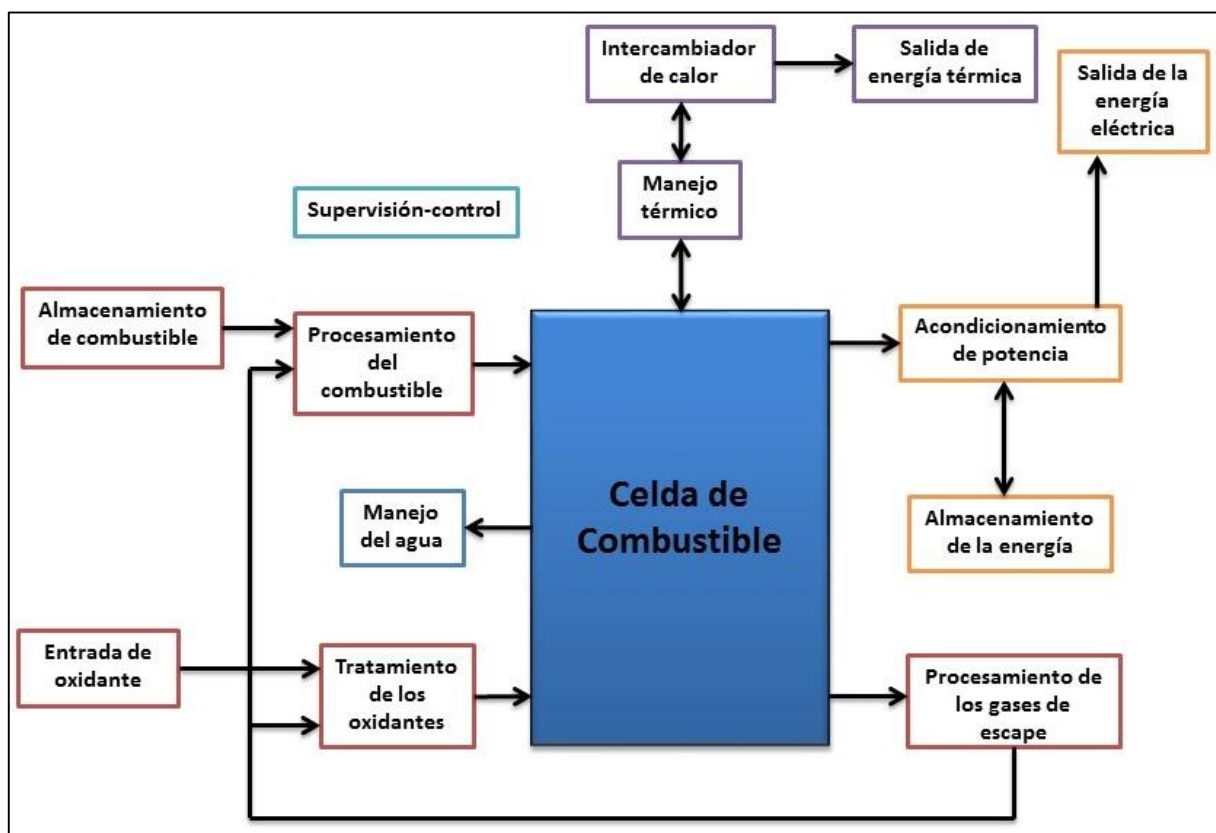


Figura 2.7 Diagrama de bloques de un sistema de celda de combustible [6].

A continuación se enlistan estos subsistemas:

- Almacenamiento y procesamiento de combustible.
- Entrada y tratamiento de oxidantes.
- Manejo de agua y humidificación.
- Manejo térmico: Intercambiador de calor
- Acondicionamiento de potencia y almacenamiento de energía.
- Procesamiento de los gases de escape.
- Supervisión y control.

2.2 Supercapacitores

Los supercapacitores son componentes electrónicos empleados para el almacenamiento de energía. Ofrecen densidades significativas de potencia y energía para diversas aplicaciones. Son intermedios entre el capacitor convencional y las baterías de acumuladores. Se caracterizan por tener una densidad de energía menor que las baterías, pero mayor que los capacitores. Empezaron a operar desde el año 2000 [3], [19], [30]. Entre los diferentes tipos de supercapacitores se encuentran los supercapacitores de doble capa, los cuales son objeto de estudio en el presente trabajo.

2.2.1 Propiedades físicas de los Supercapacitores

Las propiedades físicas de los supercapacitores dependen de su fabricación. Entre ellas se resaltan las siguientes: la superficie efectiva de los electrodos aumenta considerablemente por el uso de polvo de carbón; el tamaño del dieléctrico debe asegurar la movilidad de los iones de un electrodo a otro. Las capacitancias propuestas oscilan entre unos cuantos a miles de Faradios. No obstante, la elección del electrolito debe ofrecer las conductividades iónicas necesarias para permitir máximos voltajes admisibles que no excedan de 3 Volts [3].

Con un valor alto de capacitancia y un voltaje de operación bajo, la principal característica de los supercapacitores es la existencia del fenómeno de capacitancia de doble capa [19] que ocurre durante las fases de carga/descarga del dispositivo. La vida útil de los supercapacitores o el número de ciclos posibles es considerable, comparado con acumuladores electroquímicos (de 10^5 ciclos a 10^6 para supercapacitores).

Su densidad de energía es limitada y es necesario conocer el número de supercapacitores que se deben utilizarse para formar un banco con el fin de suministrar las necesidades energéticas de una aplicación en particular.

Al realizar el dimensionamiento de un banco de supercapacitores, debe tomarse en cuenta la noción de eficiencia durante los ciclos de carga y descarga. Esto se logra evaluando la densidad de potencia de cada supercapacitor en el banco. La noción de eficiencia puede ser más importante que la cantidad de energía almacenada puesto que define el número de supercapacitores requeridos. El banco de supercapacitores también se dimensiona en términos del nivel de energía requerido [30].

La conexión entre un banco de supercapacitores y la carga no se realiza directamente porque el voltaje en sus terminales varía según sus estados de carga. Por lo cual, se emplea un convertidor estático CC-CC o CC-CA para adaptar los niveles de voltaje y un controlador de corriente para los ciclos de carga y descarga. De esto último es importante la elección de un convertidor que posea una eficiencia alta y que no afecte la conexión de los supercapacitores en el banco.

La densidad de energía de los supercapacitores no les permite ser usados como fuentes principales de energía en la mayoría de las aplicaciones. No obstante, su densidad de potencia y tiempo de vida, hacen al supercapacitor un dispositivo de energía ideal para algunas aplicaciones de sistemas híbridos. En la mayoría de sus aplicaciones, se utiliza como un depósito de acumulación para limitar las fluctuaciones de potencia de la fuente de energía principal tales como redes, baterías, celdas de combustible, motores de combustión interna, entre otros.

2.2.2 Construcción de un supercapacitor

Un supercapacitor consta de dos electrodos galvánicamente aislados por un separador y sumergidos en un electrolito (figura 2.8). Esos electrodos se fabrican a partir de un material poroso, unido a una película metálica, generalmente de aluminio; mientras que el material poroso es de carbón (carbón activo). Cuando se carga el supercapacitor, las cargas se almacenan en el límite del material poroso y del electrolito. El uso de carbón activado permite almacenar la carga en una superficie significativa, al tiempo que ofrece una buena conductividad eléctrica.

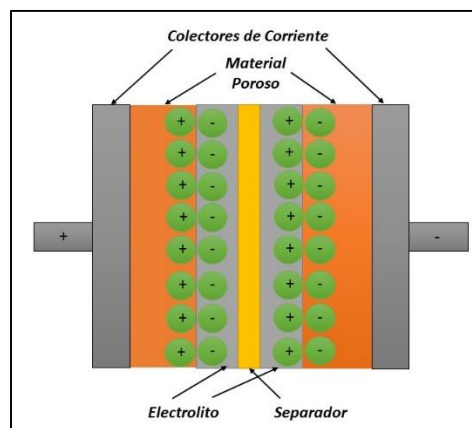


Figura 2.8 Capas que forman un supercapacitor [3].

La función del electrolito es asegurar el flujo de iones hacia los electrodos. Los aniones serán capaces de avanzar libremente hacia el electrodo positivo y los cationes hacia el electrodo negativo. El electrolito puede ser sólido, pero generalmente es líquido. La elección del electrolito resulta del compromiso entre el desempeño del voltaje y la conductividad iónica. La minimización de la conductividad iónica da lugar a una selección de electrolitos que tienen bajos voltajes de disociación (1 V). Con el fin de evitar los efectos de oxidación-reducción que conducen a efectos irreversibles durante las fases de carga y descarga, debe limitarse el voltaje de operación del supercapacitor entre 2.5 y 3 V [3]. De esto último surge la necesidad de considerar una cierta cantidad de supercapacitores para formar un banco supercapacitores y tener un voltaje lo suficientemente alto de acuerdo con la aplicación que se desee [30], [31].

El separador generalmente es una hoja de papel. Funciona como un aislador que debe prevenir el contacto galvánico entre los electrodos. Sin embargo, debe ser capaz de humedecerse en el electrolito sin reducir su conductividad iónica.

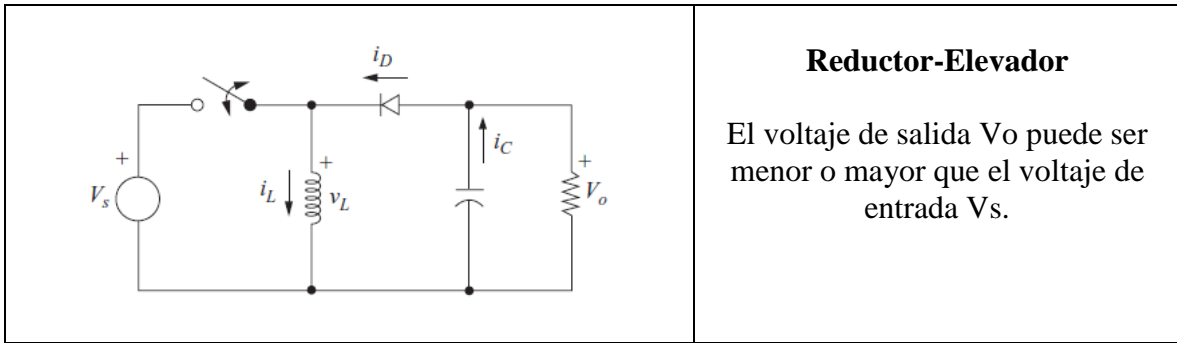
El voltaje máximo que se aplica a un supercapacitor y su capacitancia son los principales parámetros que permiten conocer la densidad de energía. Dicho voltaje está definido por la elección del electrolito. El rango de capacitancia para un supercapacitor oscila entre un Faradio y un kF (kiloFaradio). Este rango se obtiene a partir del principio de operación del supercapacitor: la doble capa eléctrica o capacitancia de doble capa [19].

2.3 Convertidores de Potencia CC-CC

Los convertidores de potencia CC-CC son circuitos electrónicos de potencia que convierten un nivel de tensión continua en otro y normalmente proporcionan una salida regulada. También se denominan fuentes de alimentación conmutadas, dentro de las cuales un transistor funciona como interruptor electrónico al estar activado o completamente desactivado.

Existen diferentes topologías de convertidores en función de la aplicación requerida. En el caso de celdas de combustible a menudo se requiere aumentar o disminuir el nivel de tensión en corriente continua que éstas producen, así como también utilizar topologías de inversores para convertir la tensión de corriente continua en alterna. Para los supercapacitores se emplean convertidores bidireccionales que elevan el voltaje que el supercapacitor entrega, y también reducen el voltaje para cargarlo. En la tabla (2.1) se muestran algunas de las topologías empleadas en celdas de combustible.

Tabla 2.1 Topología de convertidores de potencia de CC	
Topología	Tipo de convertidor
	<p>Reductor</p> <p>Reduce el voltaje de entrada V_s al valor regulado de V_o.</p>
	<p>Elevador</p> <p>Eleva el voltaje de entrada V_s al valor regulado de V_o.</p>



Existen diferentes métodos para el diseño de convertidores. Éstos dependen del voltaje de alimentación, el voltaje de salida, la máxima corriente en el inductor y potencia que se desea suministrar. Esto se verá más adelante en el capítulo VI.

2.4 Representación Energética Macroscópica

La Representación Energética Macroscópica (REM) es una herramienta empleada para la descripción gráfica de sistemas desde un enfoque energético, a través del principio de acción y reacción entre elementos que conforman un sistema. La REM destaca las propiedades energéticas de los subsistemas de un sistema completo. Partiendo del concepto de sistema se describirán los elementos que se usan para representar los sistemas y características de este método de modelado.

2.4.1 Sistema

Un sistema es un conjunto de elementos que interactúan entre sí con un objetivo determinado. Está compuesto a su vez de entradas y salidas, las cuales permiten analizar su comportamiento ante diferentes estímulos.

2.4.2 Elementos de un sistema

Los elementos que integran a un sistema se clasifican con base en diferentes criterios, definidos en función de su relación o dependencia con el tiempo, y en función de como se maneja la energía en ellos. A su vez, tales criterios permiten determinar las características que poseen los sistemas. En la figura (2.9) se observa una clasificación de los diferentes tipos de elementos que pueden formar un sistema.

Una primera clasificación (figura 2.9) permite agrupar a los elementos en estáticos y/o dinámicos:

- Elementos estáticos: son aquellos cuya reacción ante un estímulo es instantánea, no tienen dependencia en el tiempo, por lo tanto sus valores no cambian.
- Elementos dinámicos: su reacción ante un estímulo depende del tiempo.

Una segunda clasificación se hace en función de como está contenida la energía en los elementos o de cómo pasa la energía a través de estos:

- Fuentes de energía: elementos que suministran energía con la propiedad de ser considerados tanto estáticos como dinámicos.
- Disipadores de energía: son elementos estáticos, no tienen “memoria”, por lo tanto no almacenan energía. Provocan pérdidas energéticas al medio exterior.
- Almacenadores de energía: son elementos dinámicos con “memoria”. Tiene la capacidad de almacenar energía, así como de cederla. De estos se definen dos tipos: capacitivos e inductivos.
- Transformadores: son dispositivos estáticos, los cuales permiten transmitir la energía entre dos componentes con una disminución o aumento en la misma.

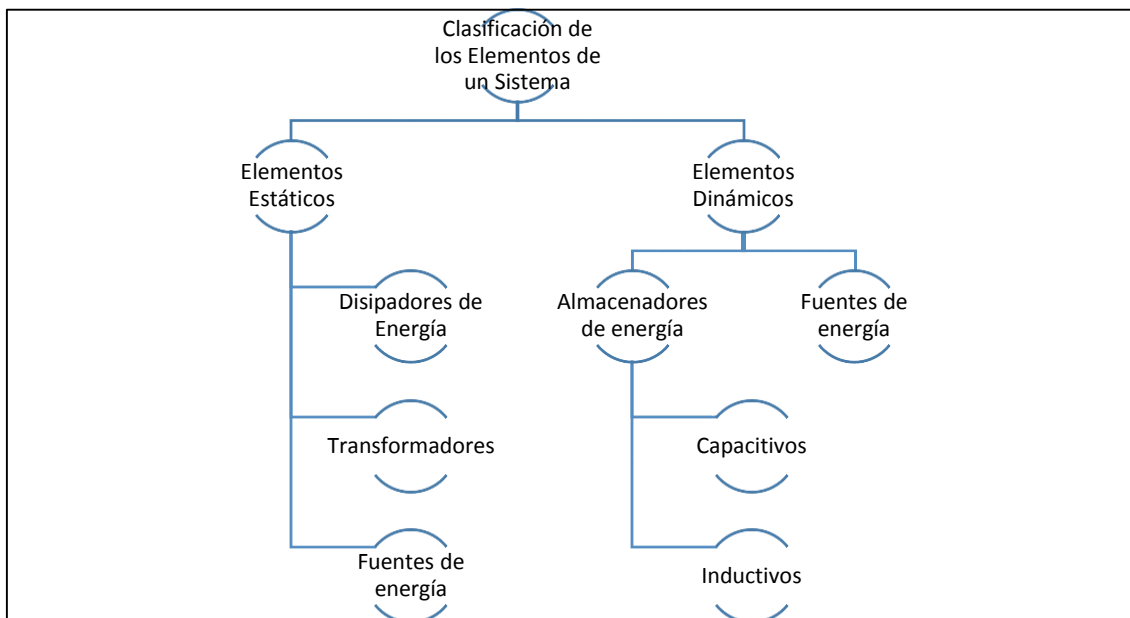


Figura 2.9 Clasificación de elementos que componen a un sistema.

Los diferentes elementos que pueden ser usados en la REM respetan la clasificación mencionada anteriormente. En la REM, los elementos se dividen en fuentes, elementos de acumulación, elementos de conversión de energía y elementos de acoplamiento o distribución. En el Anexo (I) se muestra la tabla (A.7.1) donde se enlistan los elementos de la figura (2.9) y se muestra su representación energética macroscópica.

2.4.2.1 Elementos tipo fuente

Los elementos tipo fuente proveen la energía que el sistema requiere para funcionar de medios externos, pueden ser estáticos con efecto instantáneo, o dinámicos con efecto dependiente en el tiempo. En la REM son los elementos que inician y terminan un gráfico. Se representan por óvalos color verde (figura 2.10). Su asociación con otros elementos puede ser de manera directa.

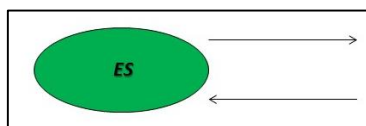


Figura 2.10 Representación de fuente de energía.

2.4.2.2 Elemento de acumulación de energía

Los elementos de acumulación de energía son dinámicos y tienen un efecto tanto capacitivo como inductivo en el almacenamiento de la energía, así como la distribución de la misma. Se representan por rectángulos con una diagonal en el interior (figura 2.11).

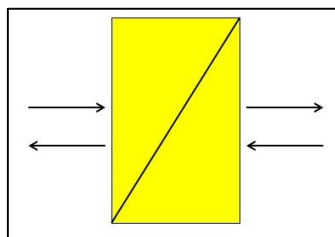


Figura 2.11 Representación de elemento de acumulación.

2.4.2.3 Elementos de conversión de energía

Los elementos de conversión de energía transforman la energía de un mismo tipo basado en una relación de aumento o disminución de la misma, de acuerdo con los requerimientos del sistema. Son elementos estáticos sin memoria. En un principio su representación se definió de acuerdo con el tipo de energía a convertir: eléctrica, mecánica, y electromecánica. Actualmente se ha generalizado su uso a dos tipos:

- Monofísico (cuadrados amarillos), que manipulan la energía de un mismo tipo, por ejemplo el voltaje en un transformador que puede disminuir o elevarse, así como también la corriente eléctrica que circula en una resistencia (figura 2.12 a).
- Multifísico (círculos amarillos), que convierte la energía de un tipo a otro, por ejemplo la energía eléctrica en un motor que se convierte en energía mecánica (figura 2.12 b).

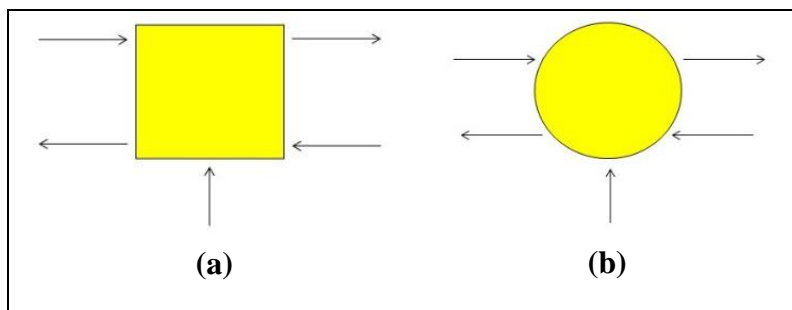


Figura 2.12 Representación de elementos de conversión de energía. (a) Monofísico. (b) Multifísico.

2.4.2.4 Elementos de acoplamiento

Los elementos de acoplamiento permiten la distribución de la energía de un mismo tipo en el sistema. No almacenan energía, por lo tanto se consideran elementos estáticos. Los elementos de acoplamiento están diseñados para asegurar las interconexiones entre los canales para la conversión. En un principio se representaron por cuadrados sobrepuestos de color amarillo. Actualmente, al igual que los elementos de conversión de energía, se consideran dos tipos monofísico (figura 2.13 a) y multifísico (figura 2.13 b).

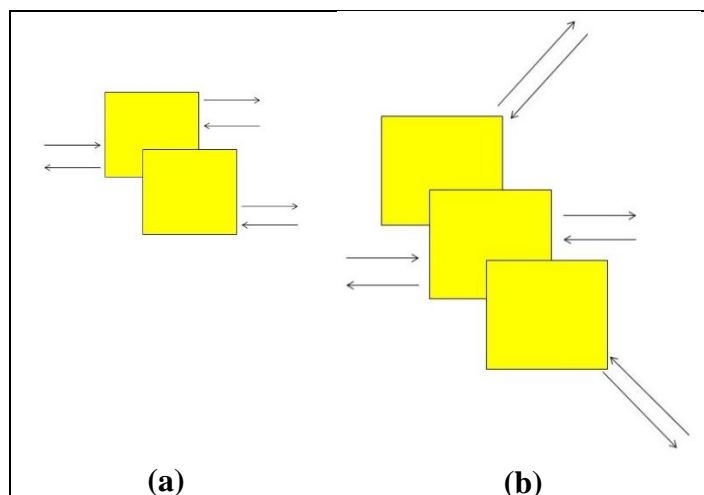


Figura 2.13 Representación de elementos de acoplamiento y/o distribución de energía. (a) Acoplamiento monofísico. (b) Acoplamiento multifísico.

2.4.3 Variables generalizadas

Los elementos descritos dentro de las clasificaciones mencionadas, se definen en función de variables generalizadas, según los elementos que los constituyen el sistema y las leyes físicas que los rigen. Esta generalización de variables a su vez permite tener una mejor comprensión de como se transmite la energía a través de los diferentes elementos que integran a un sistema, consiste en clasificar a las variables de los elementos en dos tipos: variables de potencia y variables de energía.

- Variables de potencia. Son dos variables: variables de esfuerzo generalizado e (con la que son representadas las variables de voltaje, fuerza, torque, presión, temperatura) y variables de flujo generalizado f (a través de las cuales son representadas las variables de corriente, velocidad, velocidad angular, caudal, flujo de calor).
- Variables de energía. Variables de momento generalizado p y variables de desplazamiento generalizado.

2.4.3.1 Asociación de variables en la REM. Principio de acción reacción

La asociación de las variables en la REM se basa en el principio de acción/ reacción:

“Si una acción de un medio ambiente actúa sobre un sistema, el sistema induce una reacción en este entorno.”

Para ilustrar este principio se considera el ejemplo de un motor eléctrico de CC de imán permanente. Al imponer una tensión en las terminales de alimentación se induce un flujo de corriente en el embobinado del rotor, y éste a su vez genera un campo magnético que interactúa con el campo generado por el estator. La acción del voltaje impone un flujo de corriente como reacción y la acción de este flujo genera un campo magnético como reacción. De esta manera la reacción final es la generación de un movimiento rotacional traducido como par. De manera más general, un sistema se puede dividir a en subsistemas o elementos donde el principio de acción-reacción se extiende a cada uno de ellos.

Las variables de potencia como se mencionó anteriormente son dos: **variables de esfuerzo** y **variables de flujo**. En la REM a estas variables se les conoce como variables de acción y reacción o también variables de estado. Una variable de acción es una variable de esfuerzo tal como el voltaje en un circuito eléctrico o la fuerza en un sistema mecánico. Una variable de reacción es una variable de flujo, como ejemplo se menciona la corriente en un sistema eléctrico o la velocidad en un sistema mecánico. El producto de variables de acción y reacción es la potencia instantánea intercambiada entre elementos. En la tabla (2.2), se muestra la asociación de variables de acción-reacción de diferentes sistemas.

En la REM a las variables de acción y reacción se les representa por flechas unidireccionales que están enlazadas a los elementos descritos anteriormente (figura 2.14). Los elementos contienen vectores en donde se encuentran las variables de estado. A su vez estos enlaces permiten relacionar a los elementos para constituir un diagrama en REM.

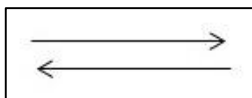


Figura 2.14 Representación de variables de acción-reacción.

Tabla 2.2 Relación de las variables de acción – reacción con diferentes tipos de sistemas.		
	<i>Acción-Reacción</i>	<i>Acción-Reacción</i>
<i>Sistema</i>	Variable de esfuerzo	Variable de flujo
<i>Eléctrico</i>	Voltaje	corriente
<i>Mecánico</i>	Fuerza	velocidad
<i>Hidráulico</i>	Presión	Flujo volumétrico
<i>Térmico</i>	Temperatura	Flujo de calor

2.4.3.2 Principio de causalidad

El principio de causalidad gobierna las relaciones energéticas de un elemento o grupo de elementos que conforman un sistema, así como también los efectos vistos en la salida de un sistema respecto a un cambio en su entrada. Por ejemplo un sistema puede ser modelado empleando ecuaciones diferenciales con variables de estado. Estas variables están asociadas con la energía y son dependientes de sus entradas y el tiempo. Al existir un cambio en la entrada, se tendrá un efecto en la salida.

Se consideran dos tipos de causalidades: la causalidad integral y la causalidad derivativa. Para el modelado basado en REM se define como causalidad natural la causalidad integral, ya que ésta respeta los flujos de energía considerando las variables de estado como retardos de sus entradas. Un modelado basado en causalidad integral permite tener una descripción física de un sistema. La causalidad derivativa por otro lado, se emplea algunas veces sólo en la simulación de los sistemas.

Similar al *Bond-Graph* [32], la REM da preferencia a las relaciones causales integrales, como se mencionó anteriormente. Tal relación se extiende tanto a elementos estáticos como a elementos dinámicos. Esta restricción se ve reflejada en las reglas establecidas para la asociación de elementos. En elementos dinámicos tales como acumuladores de energía es posible considerar por ejemplo la ecuación que define a la corriente en un inductor (figura 2.15). La entrada o variable de acción es un voltaje impuesto al mismo y su salida o variable de reacción es una corriente eléctrica, de modo que su representación toma la siguiente forma:

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt \quad (2.4)$$

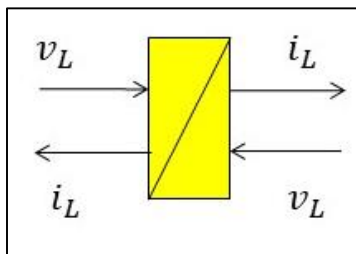


Figura 2.15 Representación de principio de causalidad integral en un inductor.

2.4.4 Reglas de asociación de elementos en la REM

Existen tres reglas fundamentales, que a través de la causalidad relacionan un elemento con otro, respetando el principio de acción-reacción para relacionar las entradas y salidas de los elementos [4].

2.4.4.1 Regla de asociación directa

Permite establecer una asociación directa entre dos o más elementos si la salida de un primer elemento corresponde a una variable de acción, que es la entrada hacia un segundo elemento. El resultado es una reacción que representa la salida del segundo elemento y a su vez es la entrada del primero. La aplicación de esta regla se ilustra en el siguiente ejemplo: se obtiene la REM del circuito RC de la figura (2.16). Como el circuito posee dos elementos dinámicos, éstos imponen su variable de acción a los demás elementos, siendo este el voltaje V_{c1} y V_{c2} (ecuación 2.5 y 2.6).

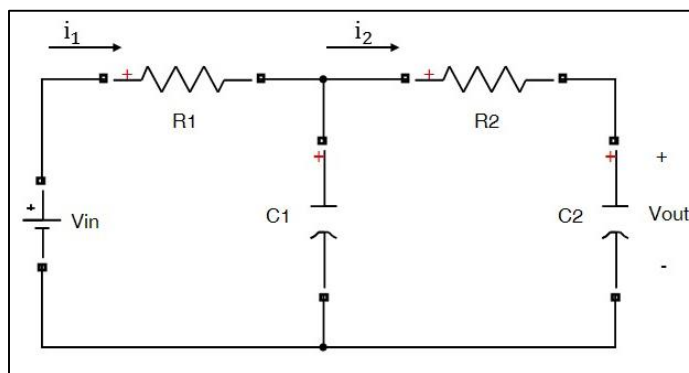


Figura 2.16 Circuito RC. Ejemplo de regla de asociación directa.

$$V_{c1} = \frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt \quad (2.5)$$

$$V_{c2} = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt \quad (2.6)$$

La REM de ambos elementos dinámicos toma la forma de la figura (2.17)

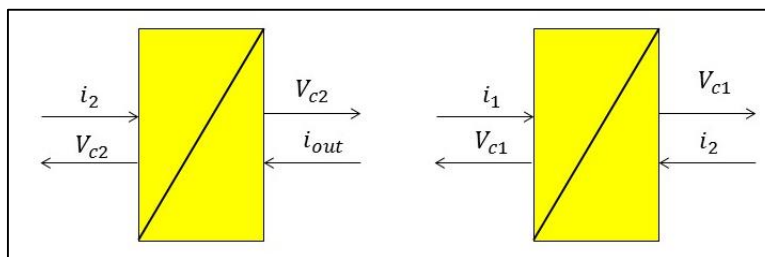


Figura 2.17 REM de elementos dinámicos del circuito RC.

Las resistencias R_1 y R_2 se modelan como elementos de conversión de energía (disipación de energía en este caso), y sus ecuaciones son las siguientes:

$$i_1 = \frac{V_{in} - V_{c1}}{R_1} \quad (2.7)$$

$$i_1 = \frac{V_{c1} - V_{c2}}{R_2} \quad (2.8)$$

La REM de los elementos de conversión de energía toma la forma de la figura (2.18)

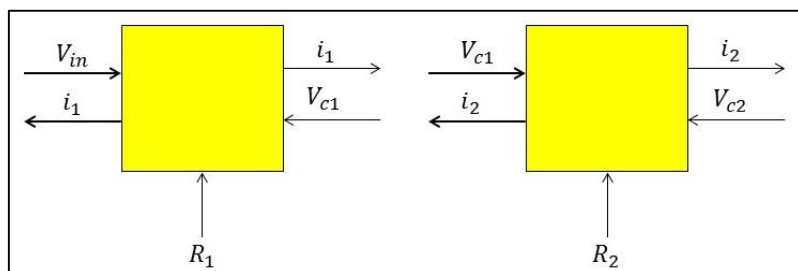


Figura 2.18 REM de elementos de conversión de energía del circuito RC.

El voltaje de alimentación V_{in} y el voltaje de salida V_{c2} se modelan como fuentes de energía (figura 2.19).

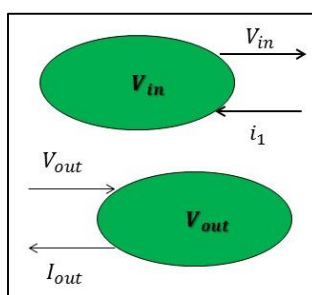


Figura 2.19 Fuentes de energía de circuito RC.

Teniendo la asignación de todas las variables y de los elementos en la REM, se realiza la asociación de todos los elementos que integran el circuito. Como se observa en las figuras (2.17), (2.18) y (2.19), se tiene una congruencia en las variables de acción y de reacción y con esto se realiza la *asociación directa* de todos los elementos, obteniendo finalmente la REM del circuito RC, mostrado en la figura (2.20).

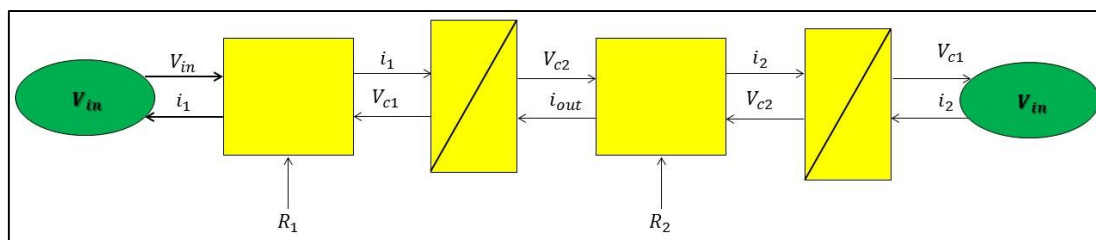
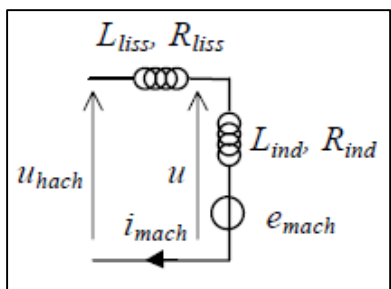


Figura 2.20 REM de circuito RC.

2.4.4.2 Regla de concatenación

Esta regla permite la conexión en serie de elementos de acumulación. Al usarla se obtiene un elemento equivalente en el que se cumple y se mantiene la causalidad integral. Un ejemplo se muestra considerando una máquina de CC, la cual tiene una bobina para disminuir el rizado. El acoplamiento se hace considerando una fuente de tensión equivalente. La REM de la máquina de CC (figura 2.21) se compone de un elemento eléctrico de almacenamiento (devanado de inducido), un elemento de conversión, y un elemento de almacenamiento mecánico (árbol). La

bobina es un elemento de almacenamiento (almacenamiento de energía cinética). Su asociación no puede ser directa. La ecuación (2.8) modela el comportamiento de la máquina de CC.



$$u_{hach} = (L_{liss} + L_{ind}) \frac{di_{mach}}{dt} + (R_{liss} + R_{ind}) i_{mach} + e_{mach} \quad (2.8)$$

Figura 2.21 Máquina de CC ejemplo de regla de concatenación.

En la figura (2.22) se observa el problema que se presenta al realizar la asociación directa de elementos en la REM de la máquina de CC. La variable de salida del primer elemento de conversión i_{liss} no es la misma que la variable de entrada del segundo elemento de conversión conectado en serie u , por lo tanto estos dos elementos de conversión no pueden ser conectados directamente.

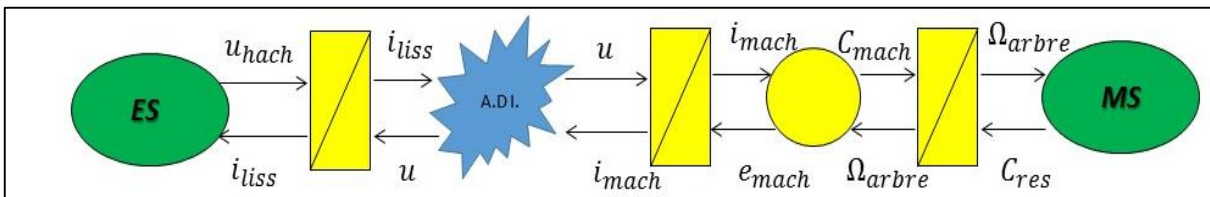
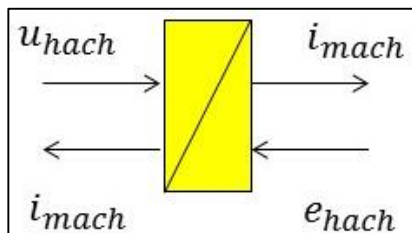


Figura 2.22 REM de máquina de C.C. con problema de asociación directa.

Para solucionar este problema de asociación, se obtiene un elemento equivalente, sumando las inductancias de los elementos dinámicos (figura 2.23). De esta manera, las variables pueden relacionarse y los elementos pueden conectarse sin problemas.



$$L_{eq} = L_{liss} + L_{ind} \text{ y } R_{eq} = R_{liss} + R_{ind} \quad (2.9)$$

Figura 2.23 Inductancia equivalente.

Finalmente se obtiene la REM de la máquina de CC como se muestra en la figura (2.24)

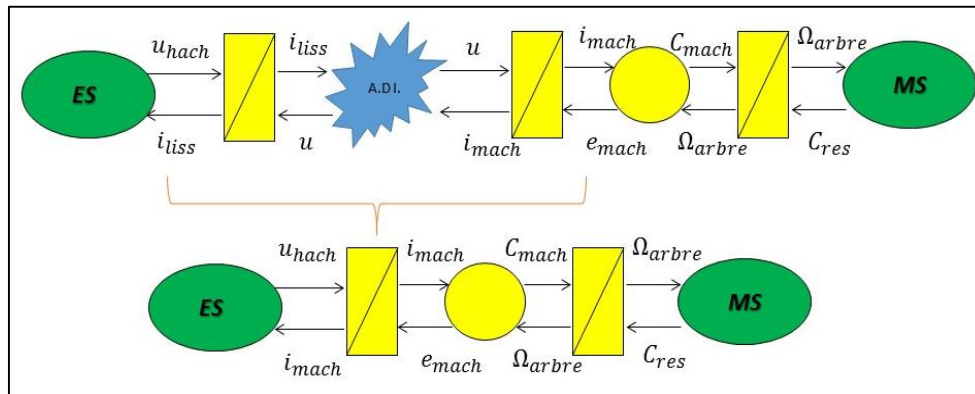


Figura 2.24 Aplicación de regla de concatenación.

La regla de concatenación aplicada al sistema del ejemplo de la figura (2.21) es necesaria porque un elemento de acumulación impone su variable de estado sobre los elementos conectados a él, impidiendo que se realice una asociación directa. En este caso, la corriente i_{mach} es común en todo el circuito, por lo tanto se puede obtener una inductancia equivalente que permite enlazar a todos los elementos. La regla de concatenación por lo tanto se puede expresar de la siguiente manera:

“La combinación de dos elementos de almacenamiento se puede lograr mediante la concatenación para resolver los conflictos de una variable de estado.”

La regla de asociación directa se aplica cuando se logra asociar un elemento fuente con un elemento de almacenamiento y que a su vez se asocia con un convertidor de energía tal y como se observa en la figura (2.24).

2.4.4.3 Regla de permutación

Para ilustrar esta regla, considere el eje de una máquina que está conectada a una carga, la cual acciona un reductor ideal (figura 2.25). La REM de este sistema muestra dos elementos de almacenamiento: los ejes (acumulación de energía cinética) y las inercias mecánicas (reductores). Su asociación directa no es posible.

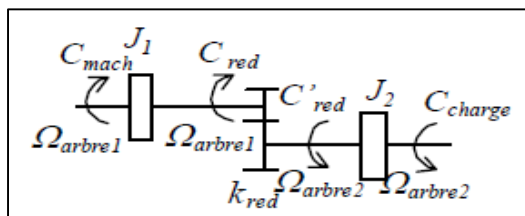


Figura 2.25 Sistema de reducción.

$$\begin{cases} \Omega_{arbre2} = k_{red} \Omega_{arbre1} \\ C'_{red} = k_{red} C_{red} \end{cases} \quad (2.10)$$

En efecto, estos elementos tienen el mismo problema de variable de estado que se observó en el problema anterior. Esta vez está oculto por la reducción: las velocidades de los ejes son diferentes (relación de reducción), pero no se pueden imponer de forma independiente.

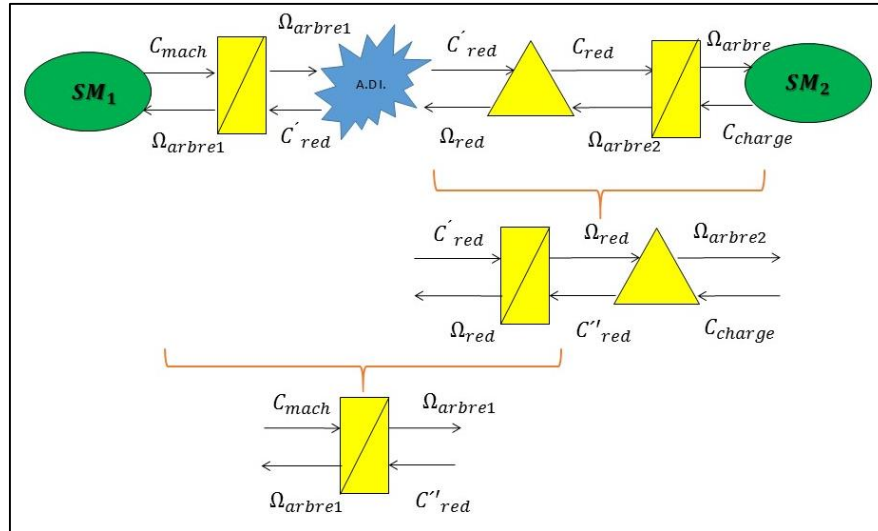


Figura 2.26 REM de sistema de reducción con problema de asociación directa.

Por concatenación puede asegurarse una permutación entre el eje y el reductor (engranaje). Es necesario buscar el eje-reductor equivalente que producirá el mismo efecto. Las ecuaciones matemáticas de los dos elementos permiten encontrar fácilmente la solución. En este caso se busca definir una inercia equivalente. Esto se observa en la figura (2.26), donde se muestra proceso de permutación entre un elemento de conversión de energía y un elemento de acumulación para posteriormente obtener un elemento equivalente de acumulación.

$$J_{eq} = J_1 + J_2 k_{red}^2 \tag{2.11}$$

$$C_{mach} = (J_1 + J_2 k_{red}^2) \frac{d\Omega_{arbre1}}{dt} + C''_{red} \tag{2.12}$$

Finalmente en la figura (2.27), se muestra la REM del sistema con la asociación directa de todos los elementos.

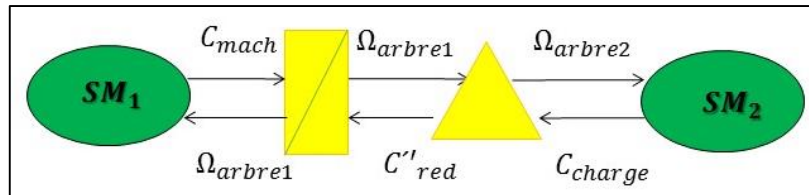


Figura 2.27 Aplicación de la regla de permutación en un sistema de engranes.

La regla de permutación por lo tanto se puede expresar como:

“Un elemento de almacenamiento y un elemento de conversión pueden ser intercambiados, siempre y cuando producen el mismo efecto en las mismas cargas.”

La regla de permutación puede ser considerada como una extensión de la regla impedancia equivalente, que también se utiliza a menudo e implícitamente en sistemas mecánicos.

Es claro que las reglas de concatenación y permutación pueden conducir a una pérdida de transparencia en el modelo REM final del sistema considerado, lo que va en contra del objetivo perseguido. Por lo tanto, deben limitarse a usarse sólo para resolver los conflictos de modelado. Por lo tanto la regla de permutación sólo se utiliza para permitir la concatenación.

2.4.5 Estrategia de control por Modelo inverso

La REM, como se mencionó anteriormente permite descomponer un sistema en elementos. Estos a su vez están interconectados a través de variables de acción y de reacción por el principio de causalidad integral. La interconexión de los elementos permite conocer el flujo de energía a través de todo el sistema, así como las entradas y salidas que deben actuar en el sistema para obtener las salidas deseadas. Este conocimiento permite aplicar el principio de inversión sobre el cual se basa la estrategia de control en sistemas REM. El principio de inversión se explica en las secciones siguientes.

De acuerdo con lo mencionado por Bouscayrol *et al.*, (2003), el modelado de sistemas permite expresar la salida, denotada comúnmente $y(t)$ como una función de la entrada $u(t)$ usando la causalidad integral. La estructura de control en la REM (figura 2.28) define la entrada que afectará al sistema con el objetivo de producir la salida deseada. Debido a esto, el control expresará la entrada ajustada $u_{tun}(t)$ como una función de la salida de referencia $y_{ref}(t)$ para invertir el sistema. [24], [25]. Es importante mencionar que las variables a controlar deben ser medibles u observables para realizar la inversión.

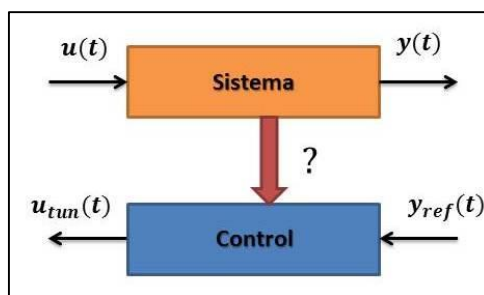


Figura 2.28 Principio de inversión.

Existen tres reglas básicas de inversión, dependiendo de las relaciones dinámicas o estáticas presentes en el modelo por REM. Estas se describen a continuación.

Relación estática de entrada simple. Esta regla permite realizar una inversión directa en una relación estática, sin mediciones ni controladores. La ecuación (2.13) muestra el ejemplo de una relación estática donde el valor de la salida depende de la ganancia k .

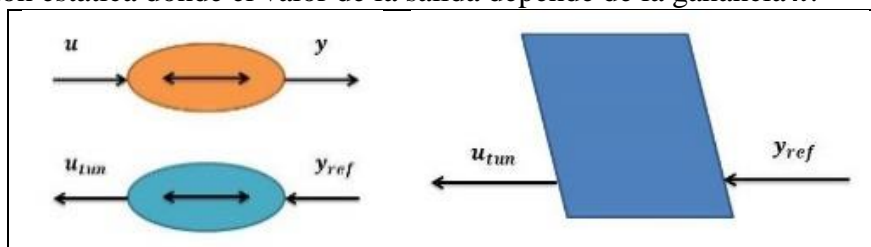


Figura 2.29 REM de relación estática de entrada simple.

$$y(t) = ku(t) \tag{2.13}$$

La inversión directa de esta relación toma la forma de la ecuación (2.14), donde la entrada del sistema, es decir la entrada sintonizada $u_{tun}(t)$ se expresa de la siguiente forma:

$$u(t) \rightarrow u_{tun}(t) = \frac{1}{k} y_{ref}(t) \tag{2.14}$$

Sustituyendo la ecuación (2.14) en (2.13)

$$y(t) = k \left(\frac{1}{k} y_{ref}(t) \right) \tag{2.15}$$

$$y(t) = y_{ref}(t) \tag{2.16}$$

Como se puede observar en la ecuación (2.16), a través de la inversión directa se establece que la salida medida u observada es igual a la salida de referencia. En la figura (2.29) se aprecia la REM que se obtiene aplicando esta regla, donde el paralelogramo azul representa la inversión directa.

Relación estática de múltiples entradas. Si se manipula una entrada para afectar la salida de una relación estática con múltiples entradas, las otras se consideran como perturbaciones. Éstas deben ser medidas o estimadas para definir la entrada sintonizada $u_{tun}(t)$ de la salida de referencia $y_{ref}(t)$. Su inversión será directa de acuerdo con el número de entradas.

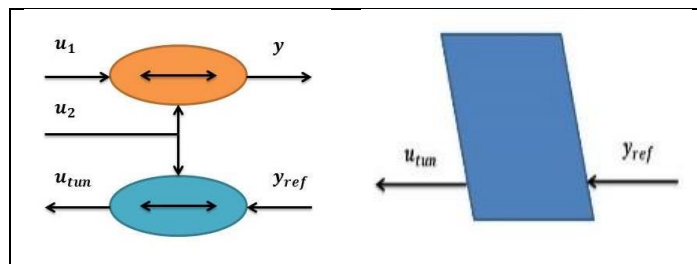


Figura 2.30 REM de relación estática de entrada simple.

Considerando la relación estática con dos entradas mostrada en la figura (2.30), la ecuación que representa esta relación es:

$$y(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (2.17)$$

Donde la entrada sintonizada es $u_1(t)$ y la entrada $u_2(t)$ se considera medible u observable.

$$u_1(t) \rightarrow u_{1tun}(t) = y_{ref}(t) - u_{2med}(t) \quad (2.18)$$

Sustituyendo la ecuación (2.18) en (2.17)

$$y(t) = y_{ref}(t) - u_{2med}(t) + u_2(t) \quad (2.19)$$

De (2.19) se obtiene

$$y(t) = y_{ref}(t) \quad (2.20)$$

Relación dinámica de entrada simple. La inversión directa de esta relación conduce a una derivación que tiene una causalidad no física. Con el fin de resolver este problema, se realiza una inversión indirecta usando un controlador. En este caso, la salida debe ser medible, por ejemplo usando un simple controlador P con una ganancia K_p . En la figura (2.31) se muestra la inversión de un elemento de acumulación.

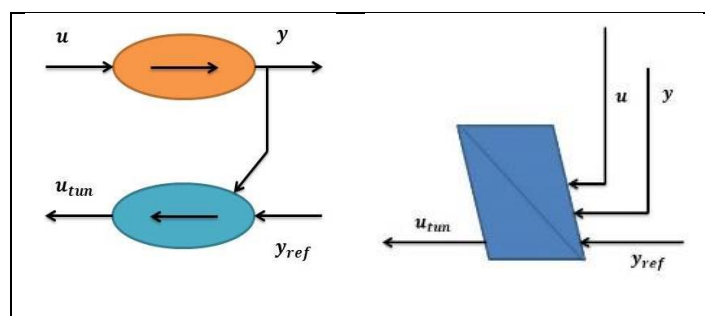


Figura 2.31 REM de relación dinámica de entrada simple.

Considerando la ecuación (2.21) que representa una relación dinámica de simple entrada, la inversión de esta se ilustra en el diagrama de bloques de la figura (2.32). La ecuación (2.22) representa la ecuación de inversión para esta relación.

$$y(t) = \int u(t)dt \quad (2.21)$$

$$u(t) \rightarrow u_{tun}(t) = K_p [y_{ref}(t) - y_{med}(t)] \quad (2.22)$$

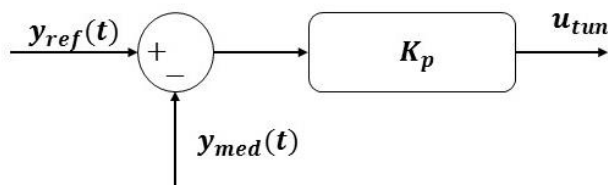


Figura 2.32 Diagrama de bloques de relación dinámica de entrada simple.

Dentro de la anterior relación, el gráfico en REM tiene una barra oblicua en el interior del paralelogramo, lo cual indica la presencia de un controlador. Para no linealidades o relaciones rígidas no definidas, no siempre es posible realizar una inversión directa. En estos casos el control, es una combinación de las tres reglas anteriores.

En un sistema híbrido, se consideran como objetivo de control mantener el voltaje que el sistema entrega a pesar de las perturbaciones en la carga, siendo el objetivo de control principal. Así mismo, es necesario asegurar los niveles de corriente que se le demanda a la celda de combustible y al supercapacitor considerando las restricciones de cada dispositivo. Para esto se consideran dos lazos de control secundarios: uno que regule la corriente demandada a la celda a través del convertidor asociado a éste y otro que regule la corriente de carga y descarga en el supercapacitor a través de su convertidor asociado. Ambos lazos de control deben trabajar en conjunto considerando una repartición de la carga entre la celda de combustible y el supercapacitor. Para esto es necesario definir una estrategia de gestión de carga que decida en que momento entrega energía la celda y en qué momento lo hace el supercapacitor.

En esta investigación, a través del control por modelo inverso se establecen dos lazos de control, uno para controlar la corriente demandada a la celda de combustible a través de la regulación del ciclo de trabajo del convertidor conectado a esta. El segundo lazo controla el ciclo de carga/descarga del supercapacitor manipulando de igual forma el ciclo de trabajo del convertidor asociado al supercapacitor. Estos dos lazos a su vez dependen de una estrategia de administración de carga, la cual permite distribuir la carga demandada entre la celda de combustible y el supercapacitor. En el Capítulo V se detalla la forma de implementar los lazos de control descritos anteriormente así como la estrategia de administración de carga a través del modelo inverso. Cabe mencionar que en la celda de combustible no se definen lazos de control como tal, sin embargo se asume que la temperatura tiene un lazo de control ideal que la mantiene perfectamente controlada a un valor constante, así como el sistema de suministro de reactantes, por lo tanto no se considera un control por modelo inverso en estos casos.

Capítulo III. Modelo de celda de combustible y supercapacitor

En este capítulo se presentan los modelos en Representación Energética Macroscópica de una celda de combustible PEM y de un módulo de supercapacitores (también conocidos como ultracapacitores o capacitores electroquímicos de doble capa). Los modelos de estas fuentes de energía eléctrica fueron integrados en el simulador de un sistema de alimentación híbrido. En primer lugar exponen los resultados de la validación de modelos con datos experimentales y de las pruebas de los modelos ante diferentes cargas. Los datos fueron registrados de pruebas realizadas en un sistema experimental de celda de combustible Bahia, así como de un banco de supercapacitores Maxwell. Tales dispositivos serán descritos en las secciones siguientes, y se establecerán las consideraciones de modelado para cada dispositivo.

En primer lugar se presenta el modelo del apilamiento de celdas de combustible del sistema *Bahia*. Se propone un modelo en circuito equivalente combinado con un modelo semi-teórico que tiene como base los modelos en estado estable y dinámico desarrollados por Zamora y Escobedo, (2005) [6].

El sistema *Bahia* cuenta con los sistemas de suministro de reactantes: tanque de hidrógeno y soplador para alimentar oxígeno; también cuenta con un circuito de enfriamiento para el apilamiento de celdas y con un humidificador de membrana para humidificar los gases que entran al apilamiento de celdas. En este trabajo se modeló la dinámica del sistema de suministro de oxígeno. Por otro lado, aun cuando el modelo del apilamiento de celdas considera el efecto de la temperatura, el control de temperatura se consideró ideal porque el sistema *Bahia* opera en todo momento con control de temperatura. De igual manera, se consideró un control ideal de humidificación de los gases que entran al apilamiento de celdas de combustible. La humedad relativa de los gases para los experimentos considerados fue en promedio de 80%.

En resumen, el modelo dinámico del sistema de celdas *Bahia* (descrito en la sección 3.1.2.2) se compone de un modelo dinámico para el apilamiento de celdas y de un modelo para el suministro de aire, los demás sistemas se asumen ideales y por lo tanto, se considera que la celda de combustible opera a temperatura constante y que los gases se alimentan con una humedad relativa constante.

El modelo del apilamiento de celdas es un circuito equivalente con parámetros dependientes de la corriente, la temperatura y el flujo de oxígeno. Este modelo cuantifica el transitorio que ocurre por la acumulación de cargas en la interface entre el electrolito y los electrodos; este fenómeno es conocido como capacitancia de doble capa; el modelo cuantifica también una caída de voltaje debida a la variación de flujo, llamada sobre tiro negativo o “undershoot”, la cual ocurre cuando hay incrementos abruptos de demanda de corriente, debido a que, ante un cambio repentino en la demanda, el voltaje cambia más rápido de lo que el sistema

de suministro de aire puede proporcionar el oxígeno necesario y esto genera una pérdida adicional de voltaje.

El modelo del suministro de aire incluye el volumen ocupado por las tuberías y las conexiones hacia la celda de combustible. Este modelo se deriva de ecuaciones de conservación de masa.

El modelo del supercapacitor es un circuito equivalente con parámetros constantes. Este modelo se obtuvo simplificando el circuito propuesto por Zubieta [19] y ajustando los parámetros con datos experimentales de un banco de supercapacitores Maxwell®, descrito en la sección 3.2.2.

3.1 Modelo de celda de combustible. Caso de estudio: Sistema experimental *Bahia*

El sistema *Bahia* es un sistema de alimentación con un apilamiento de celdas de combustible tipo PEM, es fabricada por *Helion*, una rama de *Areva* (compañía francesa de energía). Se alimenta con hidrógeno y aire. Contiene un apilamiento de 24 celdas con un área activa de 100 cm², genera una potencia máxima de 1.2 kW y es enfriada por agua.

Los reactantes son alimentados de forma externa, el hidrógeno proviene de un tanque a presión y el oxígeno se obtiene del aire alimentado por un soplador. El sistema *Bahia* es un banco didáctico experimental, en él se puede controlar el factor estequiométrico de alimentación de oxígeno en un rango de 1.5 a 2.5. También se puede elegir la temperatura nominal del apilamiento en un rango de 55 °C a 75 °C. El sistema posee una interfaz para el usuario a través de un software y una computadora. Este software permite no sólo acceder a las variables registradas, sino también programar la carga eléctrica. Gracias a esta interfaz se visualiza y registra una gran cantidad de parámetros tales como: el voltaje del apilamiento en cada una de las celdas, la corriente demandada, la temperatura del circuito de enfriamiento, el flujo de aire y de hidrógeno, entre otras. También cuenta con indicadores de presión, pero no hay registro de esta variable. El sistema *Bahia* consta de:

- Un sistema de suministro de reactantes formado por un soplador para el suministro del oxígeno a presión atmosférica y opera a un voltaje de 24 VCC. El hidrógeno es alimentado partir de un tanque a una presión de 1.3 atm.
- Un circuito de enfriamiento. La temperatura se controla con un circuito de enfriamiento que incluye un intercambiador de calor y dos ventiladores controlados por un PID.
- Un humidificador plano de membrana que humedece el oxígeno utilizando el agua que el apilamiento de celdas produce por la reacción electroquímica llevada a cabo en el cátodo.



Figura 3.1 Sistema experimental Bahia.

En la figura (3.1) se observa el sistema *Bahia* con sus diferentes dispositivos auxiliares y en la figura (3.2) el diagrama de instrumentos, aquí se observa la conexión del apilamiento de celdas con los dispositivos auxiliares. En esta investigación el modelo matemático que caracteriza la respuesta en voltaje y que fue incorporado al sistema híbrido se limita a reproducir el desempeño del apilamiento de celdas y del sistema de suministro de reactantes, no se incluye el modelado del humidificador, ni del sistema de enfriamiento.

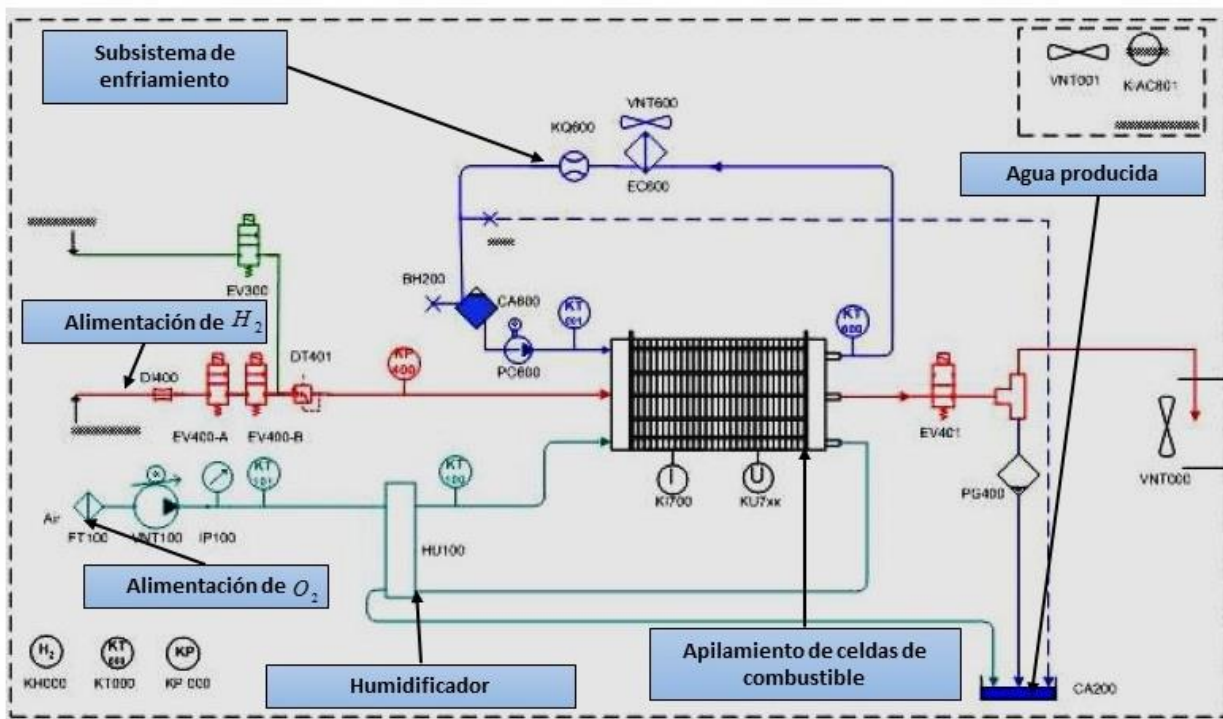


Figura 3.2 Diagrama de instrumentos del sistema Bahia.

3.1.1 Datos experimentales

Se usaron pruebas experimentales realizadas en el sistema *Bahia* con el objetivo de ajustar el modelo de forma empírica. Estas pruebas se registraron en las gráficas de las figuras (3.3), (3.4) y (3.5), y corresponden a la demanda de corriente impuesta a la celda (línea verde) y el voltaje producido (línea azul).

Las pruebas consistieron en aplicar demandas en rampas y escalones de corriente, así como también un perfil de conducción denominado ciclo NEDC (*New European Driving Cycle*, el cual representa el ciclo de manejo de un automóvil [33]). El ciclo NEDC fue escalado a una potencia de 1KW, en correspondencia con la capacidad de la celda Bahia. Se estableció una relación de estequiometría del aire de 1.5 para los escalones, rampas de corriente y el ciclo NEDC, también se fijó una temperatura de operación de 65 °C. Los datos registrados se usaron para comparar y validar la respuesta del modelo.

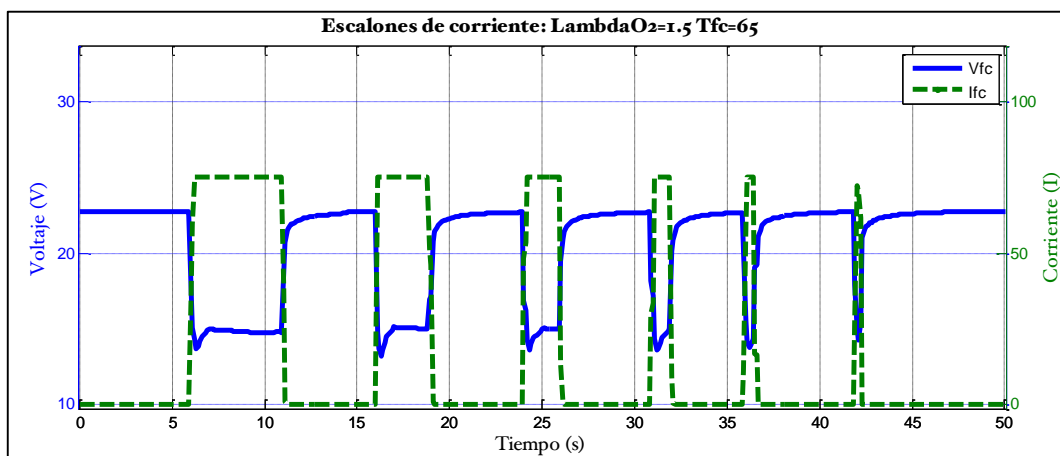


Figura 3.3 Respuesta de sistema Bahia ante escalones de corriente.

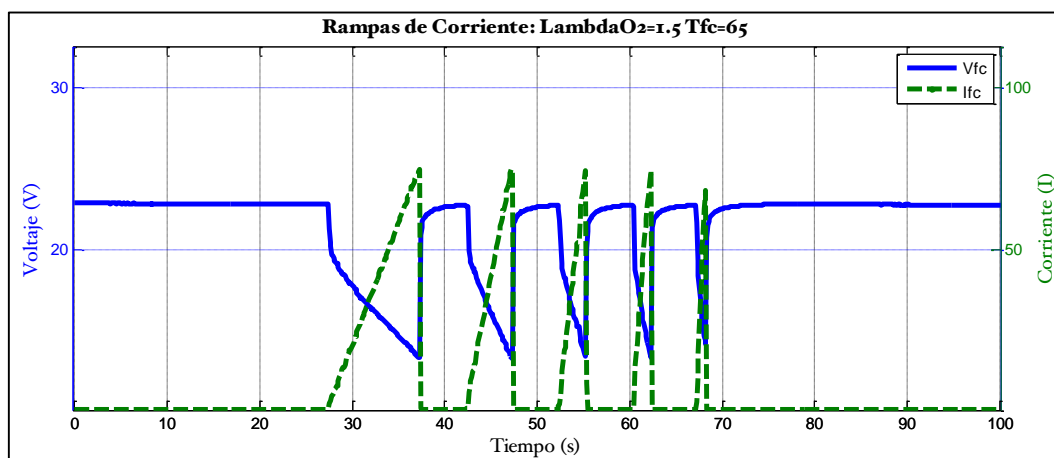


Figura 3.4 Respuesta de sistema Bahia ante rampas de corriente.

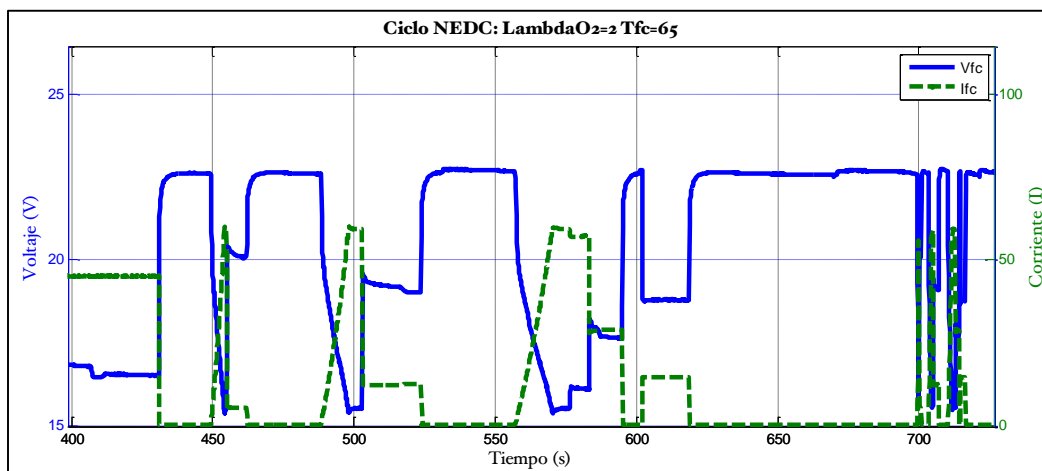


Figura 3.5 Respuesta de sistema Bahia ante ciclo NEDC de corriente.

3.1.2 Modelo matemático de apilamiento de celdas de combustible

El modelo matemático reproduce el comportamiento del apilamiento de celdas de combustible del sistema *Bahia*. Las dinámicas que se consideran son las asociadas con la respuesta eléctrica debida a dos causas: al efecto de la capacitancia de doble capa y a la variación de flujo de oxígeno. Este último produce una pérdida adicional de voltaje conocida como sobre tiro negativo o *undershoot*.

El modelo en estado estable que se propone en este trabajo toma como base el modelo semi-analítico desarrollado por Zamora y Escobedo, (2005) [6], cuyos parámetros fueron estimados a partir de datos de pruebas experimentales realizadas con técnicas de medición electroquímicas y están en función de la temperatura. En esta investigación, se ajustaron algunos parámetros del modelo, con el objetivo de reproducir adecuadamente el comportamiento eléctrico del apilamiento de celdas del sistema *Bahia*. Además, se proponen modificaciones en el modelo dinámico para cuantificar efectos no considerados en el modelo de Zamora-Escobedo [6] y que corresponden a pérdidas debidas a cambios en la presión o a la variación del flujo de fluidos en el sistema.

En las secciones siguientes se describirán las ecuaciones que caracterizan el voltaje del apilamiento en estado estable, y posteriormente el comportamiento dinámico. Estas ecuaciones se derivan del análisis teórico de los fenómenos que ocurren en el interior de una celda de combustible PEM y se fundamentan en principios termodinámicos, electroquímicos y dinámica de fluidos [6].

3.1.2.1 Modelo eléctrico en estado estacionario

El comportamiento en estado estable de la celda *Bahia* se representa mediante una gráfica del voltaje de la celda en función de la demanda de corriente. Esta representación se conoce como *curva de polarización* y representa el comportamiento de la celda de combustible en estado

estable a temperatura y presión constante. Un aumento de temperatura, aumenta el voltaje, principalmente en la zona óhmica y en la zona de concentración.

El voltaje que entrega la celda se calcula a partir de la ecuación (3.1), donde V_{fc} representa el voltaje del apilamiento de celdas de combustible, V_{Nernst} el voltaje reversible o voltaje de Nernst, V_{Act} y V_{Ohm} los sobrepotenciales de activación y óhmico respectivamente; N_{cel} representa el número de celdas contenidas en el apilamiento.

$$V_{fc} = (V_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohm})N_{cell} \quad (3.1)$$

3.1.2.1.1 Voltaje reversible o voltaje de Nernst

El voltaje reversible o potencial de Nernst se define como el voltaje reversible máximo que es posible obtener a las condiciones de presión y temperatura de la celda de combustible. El término “reversible” establece la relación de conversión efectiva de energía química a energía eléctrica; en otras palabras es la cantidad de energía química aprovechable que puede ser convertida en energía eléctrica. En la ecuación (3.2) se observa la dependencia del voltaje de Nernst con la presión de los reactantes y la temperatura de la celda. El termino E^0 representa el voltaje máximo teórico (1.23 V) a presión y temperatura estándar. Como muestra la ecuación (2.1) este valor se modifica de acuerdo con los valores de presión y temperatura [22].

$$V_{Nernst} = E^0 - 8.456 \times 10^{-4} (T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (3.2)$$

3.1.2.1.2 Sobrepotenciales o irreversibilidades

El cálculo del voltaje total que entrega la celda de combustible se obtiene considerando las caídas de voltaje o irreversibilidades. Las pérdidas de voltaje ocurren debido a diferentes factores: se deben a la activación de la reacción electroquímica (sobrepotencial de activación), a la resistencia que oponen los electrodos al flujo de electrones en la carga y la membrana al flujo de protones (sobrepotencial óhmico), y finalmente a las resistencias internas que imponen la membrana y los canales de difusión al flujo de gas (sobrepotencial de concentración). En la curva de polarización de la figura (3.6) se observan las tres regiones definidas por estas pérdidas. En el modelo propuesto sólo se consideran las pérdidas por activación y óhmicas, puesto que el apilamiento Bahía sólo operara en estas zonas para evitar daños en el apilamiento de celdas de combustible.

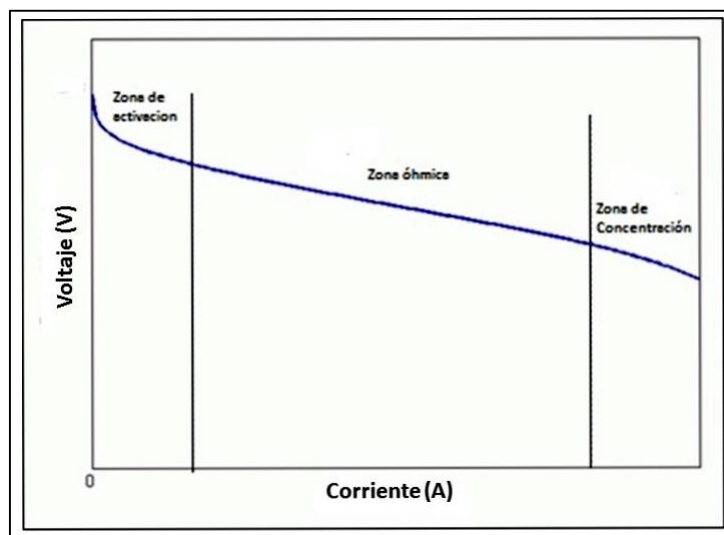


Figura 3.6 Curva de polarización de una celda de combustible con las diferentes zonas o caídas de voltaje.

La figura (3.7) muestra la curva de polarización experimental de la celda *Bahia*, donde sólo se observa la región de activación y óhmica. La línea azul representa el voltaje que entrega el apilamiento y la línea verde la potencia. Esta curva se obtuvo a una temperatura de 70 °C y está reportada en el manual de operación [34].

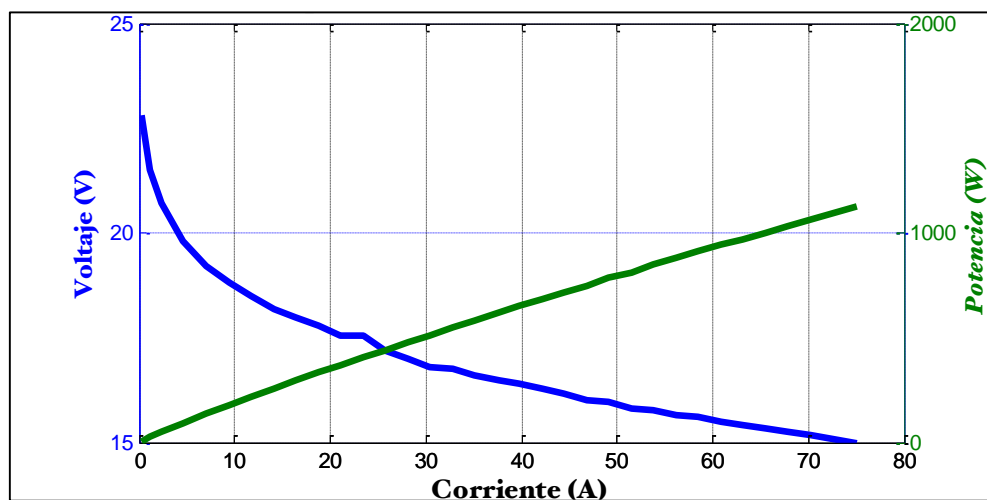


Figura 3.7 Curva de polarización de celda de combustible Bahia.

Los sobrepotenciales que considera el modelo en estado estable son los siguientes:

- **Sobrepotencial de activación:** Esta caída de voltaje es causada por la activación de la reacción que se realiza en la superficie de los electrodos. Una proporción del voltaje generado se pierde porque se utiliza para iniciar las reacciones químicas.

- **Sobrepotencial de óhmico:** Esta caída de voltaje se debe a la resistencia que se opone al flujo de electrones a través del circuito conductor entre los electrodos, así como también la resistencia del flujo de iones a través del electrolito. La caída de voltaje es proporcional a la corriente demandada, tiene un comportamiento lineal a diferencia del sobrepotencial de activación.

En la tabla (3.1) se muestran las ecuaciones que constituyen el modelo en estado estable del apilamiento de celdas de combustible del sistema Bahia. Este es una modificación del modelo de Zamora-Escobedo [6]; el cambio consiste en el ajuste de algunos parámetros: el área activa de la celda (A) es de 100 cm² [35] que afecta al sobrepotencial de activación y la resistencia óhmica (R_T) es multiplicándola por un factor de ajuste (B_1) igual a 0.02.

Tabla 3.1 Modelo en estado estable.	
$V_{fc} = (V_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohm})N_{cell}$	N_{cel} : Número de celdas en el apilamiento.
$V_{Nernst} = E^0 - 8.456 \times 10^{-4}(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5}T \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right]$	V_{Nernst} : Potencial reversible o voltaje de Nernst. T : Temperatura del apilamiento. p_{H_2} : Presión parcial del hidrógeno. p_{O_2} : Presión parcial del oxígeno.
$V_{Act} = \frac{2.3RT}{\alpha zF} \ln \left(\frac{j + j_n}{j_o} \right)$ $j = \frac{I_{fc}}{A}$ $\alpha(T) = 4.141 \times 10^{-5} T^{1.642}$ $j_o = 2.752 \times 10^{-5} \exp(2.863 \times 10^{-3} T)$	V_{Act} : Sobrepotencial de activación. R : Constante de los gases ideales. T : Temperatura del apilamiento. F : Constante de Faraday. α : Coeficiente de transferencia de carga. j : Densidad de corriente neta o resultante. j_o : Densidad de corriente de intercambio j_n : Densidad de corriente interna.

$V_{Ohm} = (j + j_n) R_T$ $R_T = B_1 (R_m)$ $\sigma_m = 3.3 \times 10^{-5} \exp(5.5 \times 10^{-3} T)$ $\rho_m(T) = \frac{1}{\sigma_m(T)}$ $R_m(T) = \frac{\rho_m(T) l}{A}$	<p>V_{Ohm}: Sobrepotencial óhmico. R_T: Resistencia total. σ_m: Conductividad protónica de la membrana. ρ_m: Resistencia protónica de la membrana. R_m: Resistencia de la membrana polimérica. l: Espesor de la membrana.</p>
---	--

El modelo en estado estable toma en cuenta el efecto de la temperatura; por lo tanto, independientemente de como fue usado en este trabajo, el modelo propuesto puede servir para ser incorporado en modelos dinámicos que incluyan variaciones de temperatura.

En la figura (3.5) se comparan las curvas de polarización simulada y experimental de la celda Bahia a una temperatura de 65°C, con presiones parciales de 1.1 y 1.3 bar, de aire y de hidrógeno respectivamente.

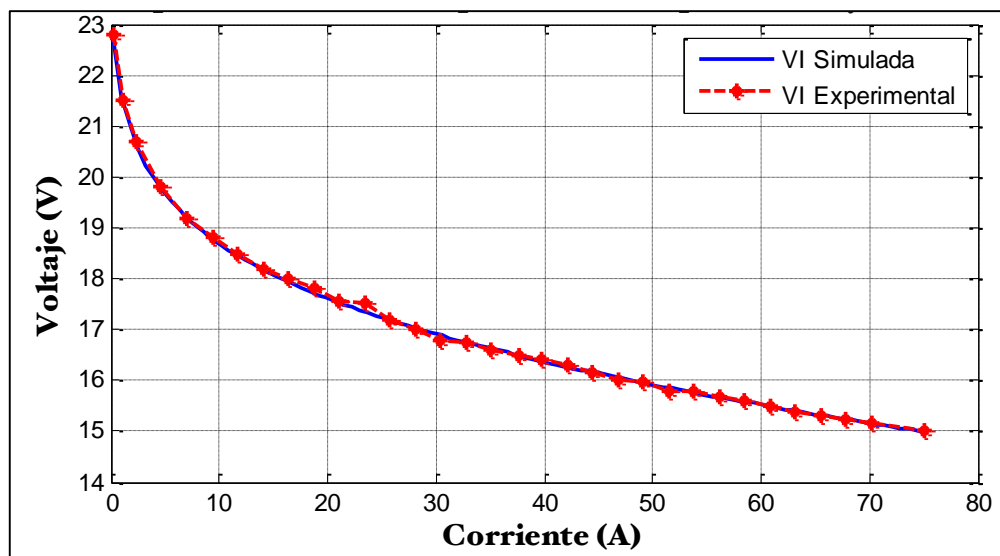


Figura 3.8 Comparación de curva de polarización experimental con modelo en estado estable.

3.1.2.2 Modelo dinámico

El comportamiento transitorio del apilamiento de celdas se ve afectado por una dinámica eléctrica debida a la variación de la carga, una dinámica de fluidos y una dinámica térmica. El efecto de las tres modifica la respuesta de la celda de combustible. El modelo dinámico de la celda de combustible PEM propuesto en esta investigación caracteriza el comportamiento transitorio, calculando la respuesta eléctrica del apilamiento de celdas de combustible mediante un modelo en circuito equivalente. El modelo considera en primer lugar, el efecto de la capacitancia de doble capa. Este fenómeno se debe a la variación de la carga y se presenta como la acumulación de cargas en la interfaz entre el electrolito y los electrodos. En segundo lugar, el modelo considera el sobretiro negativo (*undershoot*) que ocurre cuando hay un cambio en el flujo de alimentación del aire (o un cambio de presión parcial). Si hay un aumento repentino en la demanda corriente, el suministro de oxígeno no es suficiente porque su abastecimiento es más lento de lo que se necesita, y en consecuencia se produce una pérdida de voltaje adicional o sobretiro negativo. La dinámica del voltaje de la celda de combustible debida al efecto de la capacitancia de doble capa y al sobretiro negativo se muestran en la figura (3.9 a-b). En la figura (3.10) se observa la respuesta experimental del apilamiento de celdas *Bahia*.

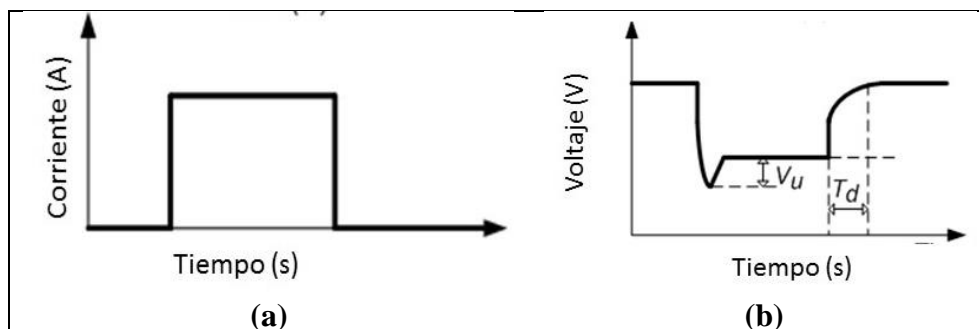


Figura 3.9 Demanda de corriente (a) y efecto de la capacitancia de doble capa y sobretiro negativo (b).

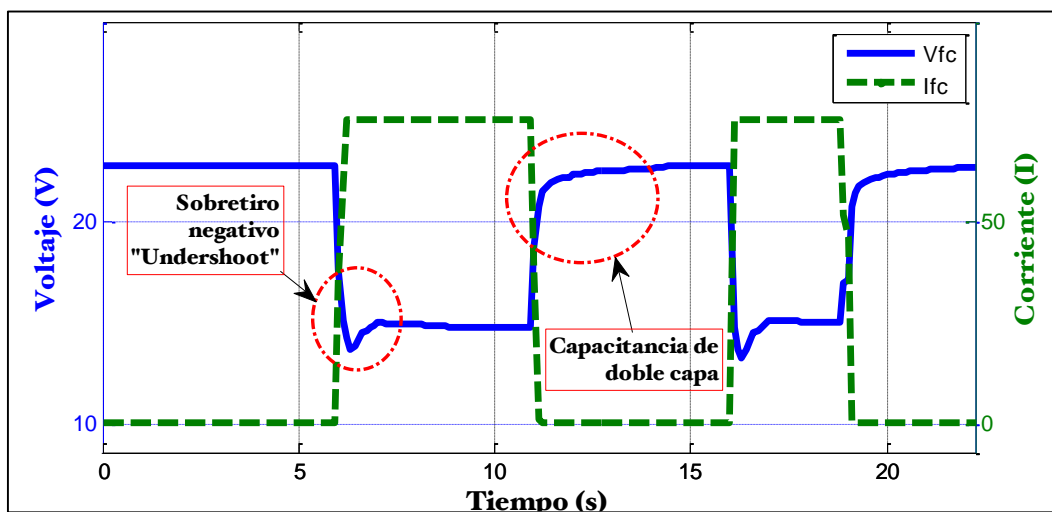


Figura 3.10 Respuesta en voltaje de celda Bahia ante demanda de corriente.

Los elementos estáticos del modelo en circuito equivalente son los mismos que los elementos característicos del modelo en estado estable, y tienen la misma dependencia con la temperatura [6]. Entre los elementos dinámicos, la capacitancia de doble capa es también función de la temperatura. Por otro lado, los parámetros que caracterizan el sobretiro negativo dependen del flujo de oxígeno. La dinámica de los fluidos se modela estableciendo los balances de materia, de esta manera se caracteriza el comportamiento de la presión en el ánodo y cátodo del apilamiento, así como también el flujo de alimentación de aire e hidrógeno [9].

3.1.2.2.1 Capacitancia de doble capa

En una celda PEM (figura 3.11), los electrodos (ánodo y cátodo) están separados por una membrana sólida, la cual solamente permite el paso de iones de hidrógeno y bloquea el flujo de electrones. Los electrones fluyen del ánodo al cátodo a través de un circuito externo. Consecuentemente, se forman dos capas con carga eléctrica de polaridad opuesta a través del límite entre el cátodo y la membrana. Estas capas se conocen como “doble capa electroquímica”, almacenan energía eléctrica, y en consecuencia se comportan como un capacitor eléctrico [2].

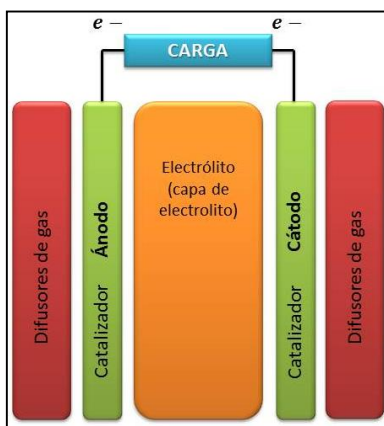


Figura 3.11 Diagrama esquemático de una celda de combustible PEM.

De acuerdo con Larminie y Dicks, (2003) [2], el fenómeno de capacitancia de doble capa afecta directamente al sobrepotencial de activación y al sobrepotencial óhmico y por lo tanto modifica la respuesta eléctrica de la celda. Como se mencionó en el párrafo anterior, la doble capa electroquímica es un almacenador de carga y se comporta como un capacitor eléctrico. Si la corriente cambia, tomará tiempo para que la carga se libere, en el caso de que la corriente disminuya; o se acumule, si la corriente aumenta. Debido a esto, el sobrepotencial de activación no responde de la misma forma que el sobrepotencial óhmico ante un cambio en la corriente. El resultado es que, si la corriente cambia de forma abrupta, el voltaje que la celda entrega, muestra un cambio inmediato debido a la resistencia interna, pero se mueve muy lentamente a su valor en estado estable. Una forma de modelar el comportamiento descrito anteriormente, es a través de un circuito equivalente donde el fenómeno de capacitancia de doble capa se modela como un capacitor eléctrico, caracterizado por una capacitancia de doble capa dependiente de la temperatura [2].

La conexión entre la capacitancia eléctrica C_{dl} , la carga almacenada en esta y los sobrepotenciales de activación y óhmico puede interpretarse como se muestra el circuito equivalente de la figura (3.12). La fuente de voltaje E_{Nernst} modela la caída de tensión reversible. La resistencia R_T modela el sobrepotencial óhmico. El sobrepotencial de activación se modela con la resistencia R_d [6].

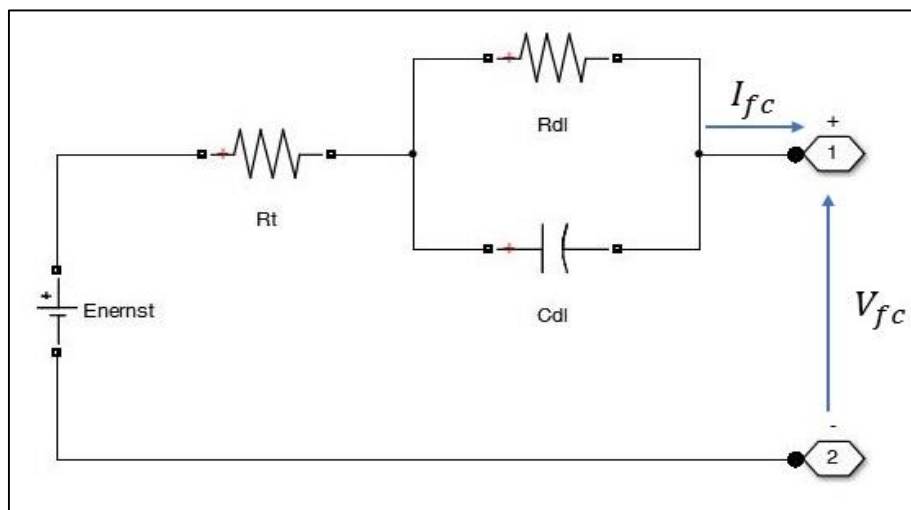


Figura 3.12 Circuito equivalente para obtener el modelo dinámico [6].

3.1.2.2.2 Sobretiro negativo (*undershoot*)

El sobretiro negativo se observa en la figura (3.9b). La caída de voltaje producida se debe a la variación en el flujo del aire de alimentación, el cual es un efecto asociado a la falta de oxígeno, es decir a la dinámica del flujo y presión cuando se presenta un aumento abrupto en la demanda de corriente [36]. La velocidad de reacción se reduce debido a que el voltaje de la celda se incrementa más rápidamente de lo que el oxígeno puede ser suministrado.

Para modelar este fenómeno, se propone modificar el circuito equivalente mostrado en la figura (3.12), introduciendo un circuito RLC en paralelo donde los parámetros L y C varían con el flujo de aire suministrado a la celda y permiten caracterizar la caída de voltaje debido al comportamiento descrito anteriormente. La dinámica de flujo de fluidos es análoga a la dinámica instantánea de un inductor eléctrico. El elemento inductor, en paralelo con la capacitancia, introduce el efecto de la variación del flujo de gas, además, es posible considerar el parámetro de inductancia variable y dependiente del flujo de oxígeno. La respuesta en voltaje del circuito RLC es de segundo orden, lo que corresponde con la forma del sobretiro negativo que se observa en la celda de combustible. La resistencia determina la amplitud de la caída.

En la figura (3.13) se presenta el modelo en circuito equivalente que se propone para predecir la respuesta eléctrica del sistema Bahia, considerando los dos fenómenos descritos. En la tabla (3.2) se observan las ecuaciones del modelo, las cuales corresponden a las diferentes caídas de voltaje en el circuito.

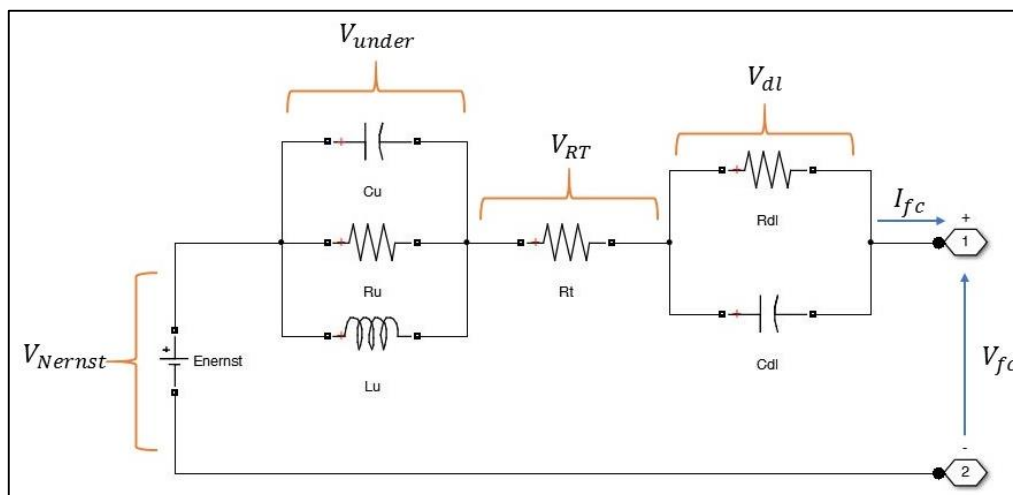


Figura 3.13 Circuito equivalente de respuesta eléctrica del sistema Bahía.

Los parámetros que caracterizan el efecto de la capacitancia de doble capa y el sobretiro negativo están en función de la temperatura del apilamiento y del flujo de aire alimentado respectivamente. La capacitancia de doble capa se modela con la relación propuesta por Zamora y Escobedo, (2005) [6]; pero, al igual que el ajuste de la resistencia total de la celda, el valor de capacitancia de doble capa se obtiene multiplicando la ecuación de la capacitancia de doble capa por un factor (B_2) igual a 0.04. Los parámetros C_u , L_u y R_u se estimaron ajustando el modelo a los datos experimentales provenientes del sistema Bahía, estos no aparecen en el modelo dinámico de [6], forman parte de la extensión del modelo dinámico que se propone en el presente trabajo.

Tabla 3.2 Modelo transitorio de celda Bahía.

$V_{fc} = (V_{Nernst} - V_{under} - V_{Rt} - V_{dl}) N_{cell}$	<p><u>Voltaje de apilamiento del sistema Bahía</u></p>
$V_{Nernst} = E^0 - 8.456 \times 10^{-4} (T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right]$	<p><u>Voltaje de Nernst</u></p>
$\dot{V}_{under} = \left(-\frac{1}{L_u C_u} j - \frac{1}{R_u C_u} V_{under} + j \right) \frac{1}{C_u}$ $C_u = 0.3 \log(F_l) + 1e^{-15}$ $L_u = 0.007 \log(F_l) + 2e^{-17}$ $R_u = 0.1177$	<p><u>Sobretiro negativo (undershoot)</u></p>

$V_{Rt} = (j + j_n) R_T$ $R_T = B_1 (R_m)$ $\sigma_m = 3.3 \times 10^{-5} \exp(5.5 \times 10^{-3} T)$ $\rho_m(T) = \frac{1}{\sigma_m(T)}$ $R_m(T) = \frac{\rho_m(T) l}{A}$ $B_1 = 0.02$	<p><u>Sobrepotencial óhmico</u></p>
$\dot{V}_{dl} = \frac{1}{C_{dl}} I_{fc} - \frac{1}{R_d C_{dl}} V_{dl}$ $C_{dl} = (5.2532 T^{-1.3858}) B_2$ $R_d = \frac{V_{Act}}{j}$ $B_2 = 2.8$	<p><u>Capacitancia de doble capa</u></p>

3.1.3 Modelo de suministro de reactantes

La caracterización de la dinámica del suministro de los reactantes se tomó del trabajo realizado por Pukrushpan *et al.*, (2003) [37], el cual modela el suministro de reactantes a la celda como se puede observar en la figura (3.14).

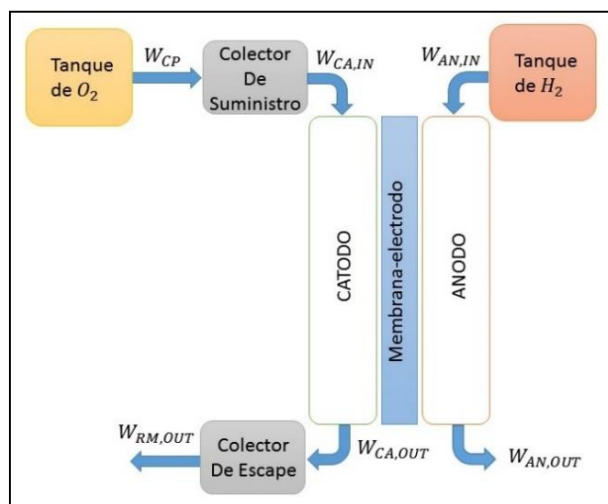


Figura 3.14 Subsistema de suministro de reactantes [9].

3.1.3.1 Colector de Suministro

El modelo del colector o distribuidor representa el volumen agrupado de las tuberías entre el tanque de alimentación y la celda de combustible, mientras que el colector de retorno representa las líneas de tubería de escape de los reactantes.

El principio de conservación de la masa es usado para desarrollar el modelo del colector:

$$\frac{dm}{dt} = W_{in} - W_{out} \quad (3.3)$$

Donde m es la masa del gas acumulado en el volumen del colector y W_{in} , W_{out} son los flujos de masa de la entrada y la salida del colector. Asumiendo que la temperatura del reactante es constante en el interior del colector, y es igual a la temperatura del flujo de entrada, es decir $T = T_{in}$, la dinámica del llenado del colector sigue una relación isotérmica:

$$\frac{dP_{sm}}{dt} = \frac{R_a T}{V_{sm}} (W_{in} - W_{sm,out}) \quad (3.4)$$

Para calcular el flujo de salida del colector W_{out} , se emplea la ecuación del flujo de boquilla.

$$W_{sm,out} = k_{sm} (P_{sm} - P_{ca}) \quad (3.5)$$

3.1.3.2 Colector de escape

La ecuación que modela al colector de escape es similar al del suministro, la temperatura de salida del reactante se asume igual que la temperatura de la celda.

$$\frac{dP_{rm}}{dt} = \frac{R_a T_{rm}}{V_{rm}} (W_{ca,out} - W_{rm,out}) \quad (3.6)$$

Para calcular el flujo de entrada al colector de retorno $W_{ca,out}$ se usa la ecuación (3.7)

$$W_{rm,out} = k_{rm} (P_{ca} - P_{rm}) \quad (3.7)$$

El flujo de salida del colector de escape $W_{rm,out}$ es gobernado por la ecuación no lineal de la boquilla y está en función de la presión del colector de escape, la presión atmosférica y la temperatura de la celda.

$$W_{rm,out} = \frac{C_{D,rm} A_{T,rm} P_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \left(\frac{P_{atm}}{P_{rm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{rm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

3.1.3.3 Presión en el cátodo y ánodo del apilamiento

Estableciendo los balances de materia y usando la ley de los gases ideales se deducen las siguientes ecuaciones diferenciales que permiten calcular el comportamiento tanto de la presión en el cátodo como en el ánodo del apilamiento.

$$\frac{dP_{ca}}{dt} = \frac{RT_{fc}}{V_{ca}} (W_{O2in} - W_{O2out} - W_{O2react}) \quad (3.9)$$

$$\frac{dP_{an}}{dt} = \frac{RT_{fc}}{V_{ca}} (W_{H2in} - W_{H2react}) \quad (3.10)$$

Donde W_{O2in} , W_{O2out} y $W_{O2react}$ son el flujo de oxígeno suministrado, flujo de oxígeno de salida y consumido.

El flujo de oxígeno suministrado en el apilamiento depende del factor estequiométrico del aire, de la potencia P_e y del voltaje de una celda en el apilamiento V_{cel} .

$$W_{in} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_{fc}}{V_{cel}} \quad (3.11)$$

El factor estequiométrico del oxígeno es denotado por λ y se define como la relación entre la cantidad de oxígeno que entra al apilamiento y la cantidad de oxígeno requerido para suministrar la corriente demandada.

$$\lambda = \frac{W_{O_2 in}}{W_{O_2 react}} \quad (3.12)$$

El flujo de oxígeno e hidrógeno consumido depende de la corriente demandada al apilamiento de celdas I_{FC} , el número de celdas contenidas en el apilamiento N_{Cell} , la masa molar del oxígeno e hidrógeno M_{O_2} , M_{H_2} y la constante de Faraday ($96485.3399 C \cdot mol^{-1}$)

$$W_{O_2 react} = \frac{I_{fc} \times N_{Cell}}{4F} M_{O_2} \quad (3.13)$$

$$W_{H_2 react} = \frac{I_{fc} \times N_{Cell}}{2F} M_{H_2} \quad (3.14)$$

En la figura (3.15), se muestra el diagrama de bloques de la conexión del modelo de suministro de reactantes con el modelo del apilamiento de celdas del sistema Bahía. Como se observa el cálculo de los flujos de hidrógeno y oxígeno están en función de la corriente demandada al apilamiento; el voltaje del apilamiento está en función de la presión en el cátodo y el ánodo del apilamiento así como de la temperatura y la corriente demandada.

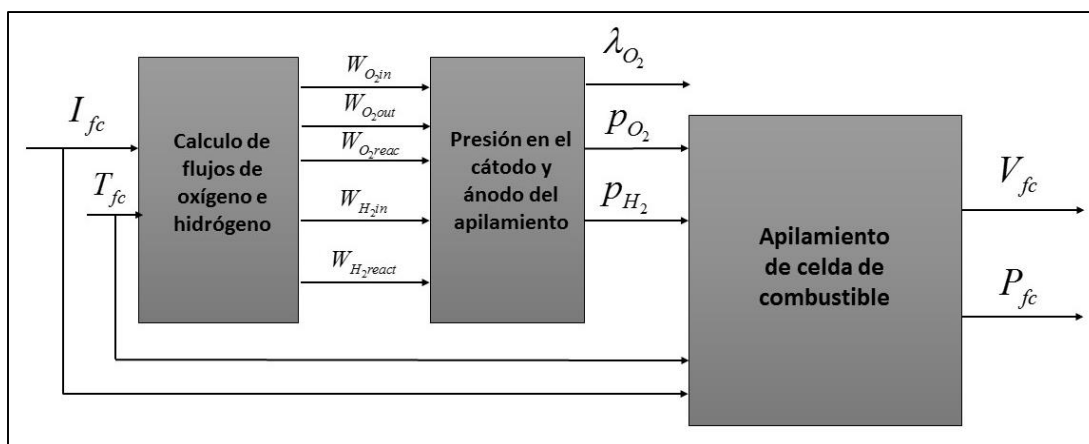


Figura 3.15 Diagrama de bloques del modelo de celda de combustible Bahía.

3.1.4 Representación Energética Macroscópica de modelo transitorio de celda Bahia

La REM de la celda Bahia (figura 3.16) se obtiene del modelo por circuito equivalente de la figura (3.10). Cada uno de los bloques contiene el cálculo asociado al elemento correspondiente. Un elemento tipo fuente representa el cálculo del voltaje de Nernst. Elementos de acumulación de energía modelan el voltaje de la capacitancia de doble capa, donde los parámetros en el circuito equivalente son C_{dl} y R_{act} ; en el caso del voltaje del sobretiro negativo los parámetros son C_u , L_u , y R_u . Un elemento de conversión monofísico modela el comportamiento de la resistencia R_T , es decir el sobrepotencial óhmico. Finalmente un elemento de acoplamiento monofísico permite enlazar las tres caídas de voltaje producidas en el circuito teniendo como variable común la corriente I_{fc} demandada a la celda. El voltaje que la celda produce es multiplicado por el número de celdas que integran al apilamiento.

Así mismo dentro del bloque del cálculo del voltaje de Nernst se encuentra las ecuaciones del modelo de suministro de reactantes que y del bloque del sobretiro negativo se encuentran los cálculos del oxígeno suministrado.

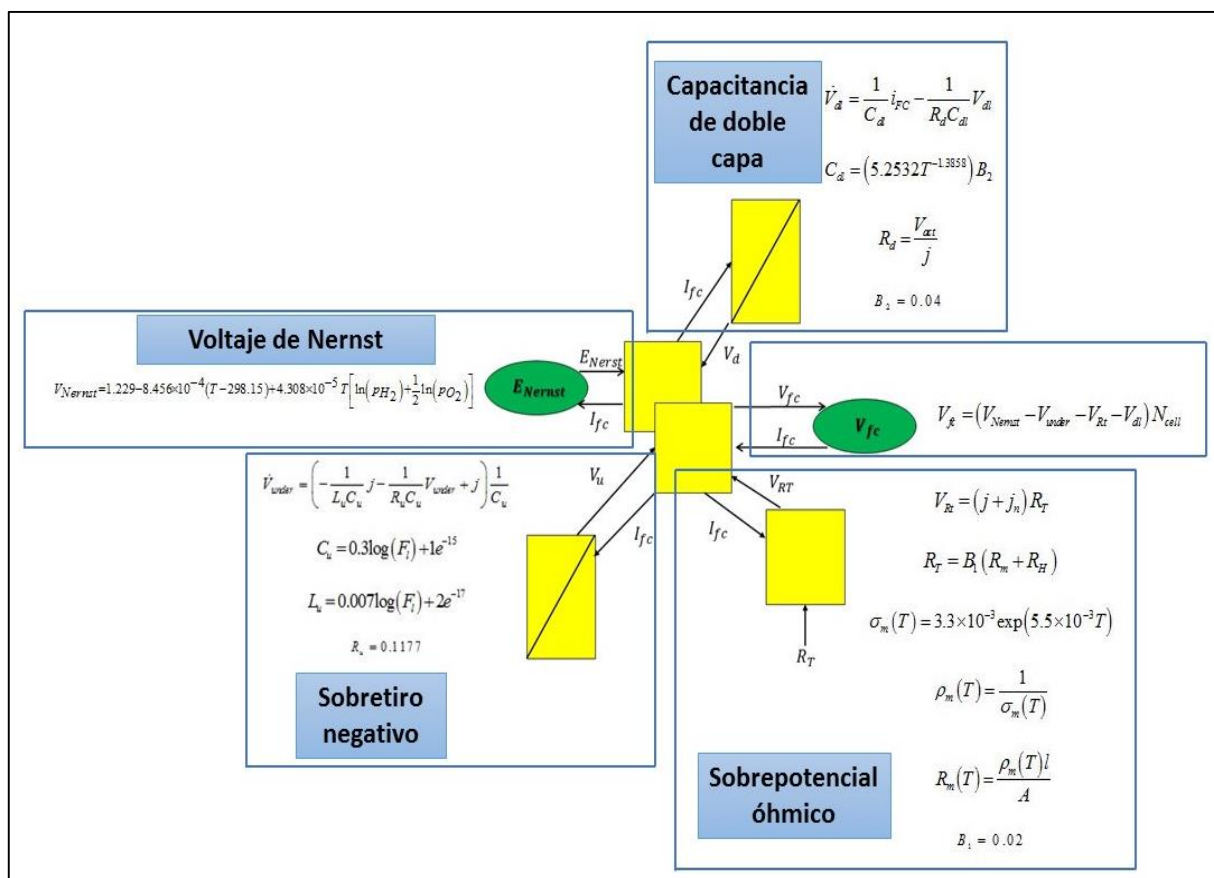


Figura 3.1 REM de circuito equivalente de celda Bahia.

3.2 Modelo matemático de supercapacitor. Caso de estudio: Banco de supercapacitores Maxwell®

3.2.1 Banco de supercapacitores Maxwell®

El banco de supercapacitores Maxwell® (figura 3.17) está integrado por seis supercapacitores conectados en serie, posee una capacitancia de 500 Faradios y un voltaje máximo de 16 V. Opera a una temperatura entre -40 y 70 °C. Su capacidad ante picos de corriente es entre 100 y 160 A. En el Anexo III se enlistan algunos parámetros de fabricación del supercapacitor así como el enlace para su hoja de datos



Figura 3.16 Banco de supercapacitores Maxwell®.

3.2.2 Modelo matemático de supercapacitor

El modelo matemático del supercapacitor es un circuito equivalente que modela la respuesta eléctrica ante ciclos de carga de y descarga. Un primer modelo fue realizado por Zubieta y Burnet, (2000) [19], quien realiza la caracterización de un supercapacitor a través de mediciones experimentales.

Se han publicado algunos modelos simplificados basados en el circuito propuesto por Zubieta y Burnet, (2000) [19] para varias aplicaciones, y en esta investigación se propone también usar un modelo simplificado derivado del modelo de Zubieta, 2000 [19], este consiste en el circuito de la figura (3.18). Se trata de un arreglo en paralelo de capacitores (C_{i0} y $C_{i1} \times V_{ci0}$), uno de ellos es dependiente del voltaje del otro y modela el efecto de la capacitancia de doble capa del supercapacitor. Una resistencia en serie (R_{i1}) con el arreglo de capacitores modela la resistencia interna de los materiales del supercapacitor.

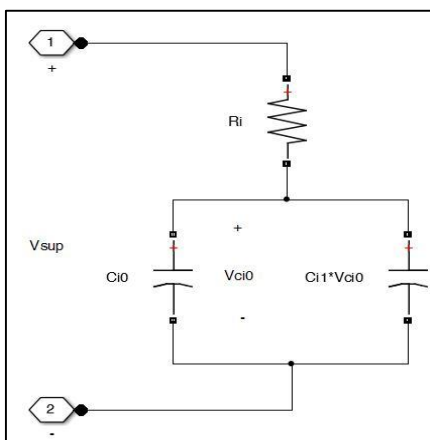


Figura 3.17 Simplificación del modelo de Supercapacitor.

Los parámetros del circuito equivalente de la figura (3.18) se ajustaron con datos obtenidos de pruebas realizadas experimentalmente en el banco de supercapacitores. En la tabla (3.3) se muestran los parámetros correspondientes a cada elemento.

R_i	0.034 Ω
C_{i0}	305 F
C_{i1}	10.5075 F/V

3.2.3 Representación energética macroscópica del modelo por circuito equivalente de supercapacitor

La REM del circuito equivalente del supercapacitor (figura 3.18) se realizó de la siguiente forma: un elemento de acumulación representa el comportamiento del voltaje asociado a los capacitores C_{i0} y C_{i1} y un elemento de conversión monofísico modela la dinámica de la resistencia R_i . Por lo tanto la REM del supercapacitor toma la forma de la representación mostrada en la figura (3.19). De acuerdo con Boulon *et al.*, (2007) [18] las ecuaciones que modelan la dinámica del supercapacitor son las siguientes:

$$V_{ISR} = R_i \times I_{Sup} \quad (3.15)$$

$$V_{Sup} = \frac{1}{C_{i0} + C_{i1}V_{Ci0}} \int I_{Sup} dt \quad (3.16)$$

$$V_{Sup} = V_{ISR} + V_{Sup} \quad (3.17)$$

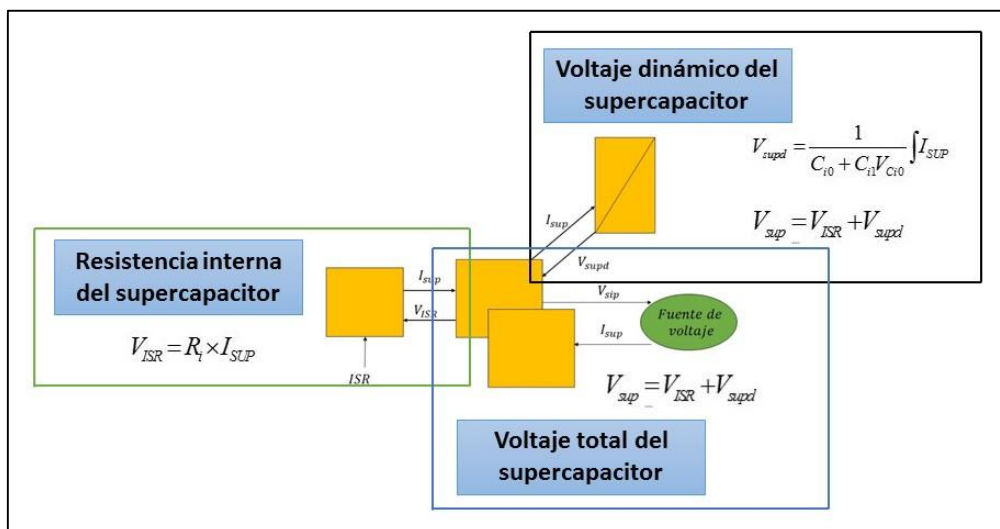


Figura 3.18 REM de modelo de supercapacitor.

3.3 Simulación de los modelos de celda de combustible-supercapacitor y validación con datos experimentales

Las simulaciones de los modelos de celda de la combustible y del supercapacitor se realizaron en el software Matlab® 2013a. En el caso de los circuitos equivalentes se utilizó la librería de componentes eléctricos Simscape de Simulink. Para la simulación de los modelos REM se utilizó una librería que se descargó de la página oficial de la REM de la universidad de Lille (Francia) (<http://www.emrwebsite.org/library.html>). En el Anexo (II) se describe la implementación de ambos modelos usando las librerías correspondientes.

La validación de ambos modelos se llevó a cabo comparando las simulaciones con datos experimentales registrados tanto del sistema de celdas de combustible *Bahia*, como del banco de supercapacitores Maxwell®.

3.3.1 Validación del modelo de celda de combustible

Los datos experimentales graficados en la sección (3.1.1) muestran el voltaje de la celda *Bahia*, ante tres perfiles de carga: escalones de corriente, rampas de corriente y ciclo NEDC. Se tomó el voltaje experimental para validar el modelo REM y el modelo por circuito equivalente. En el Anexo IV se presentan las gráficas que resultan del modelo de suministro de reactantes. Se calcula el error cuadrático promedio (ECM) del total de los datos, y también se calcula el error considerando sólo los transitorios.

Escalones de corriente. La primera prueba realizada fue una demanda de escalones de corriente como entrada para el modelo REM (figura 3.20) y para el modelo en circuito equivalente CE. En la figura (3.21) se compara el voltaje experimental con el voltaje simulado.

Como se observa en las gráficas de la figura (3.22), el modelo se ajusta a los datos experimentales. El error entre el modelo y los datos es cercano a cero, en el estado estable se tiene un ECM total de **0.1407**. El ECM en el primer transitorio (5-10 segundos.) corresponde al sobretiro negativo en la figura (3.21) y es igual a **0.0172**. El segundo transitorio corresponde a la dinámica de la capacitancia de doble capa (10-15 segundos) y tiene un valor de **0.0590**.

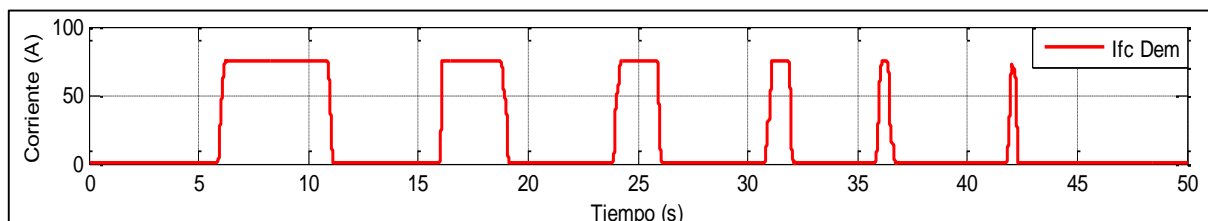


Figura 3.19 Escalones de corriente.

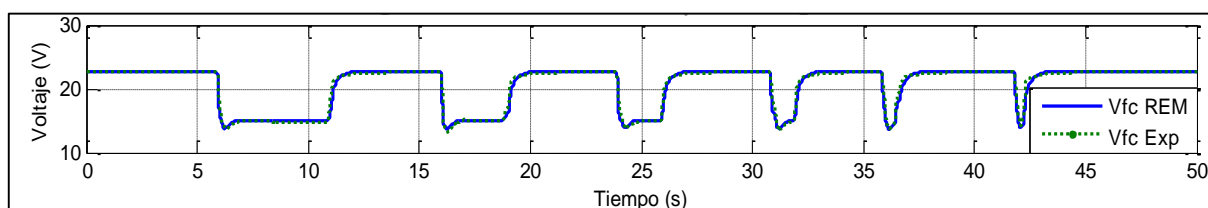


Figura 3.20 Respuesta del modelo REM y datos experimentales.

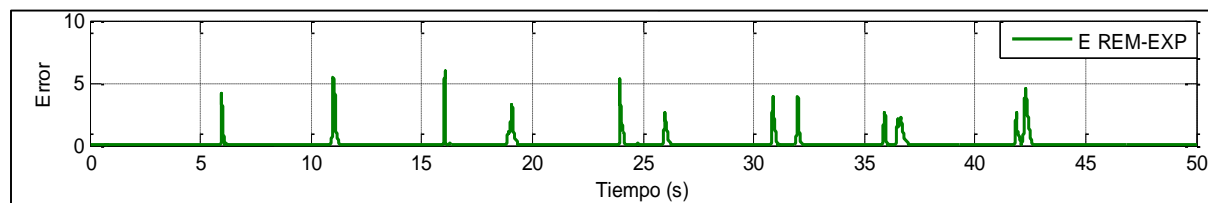


Figura 3.21 Error entre el modelo REM y los datos experimentales.

La respuesta del circuito equivalente se muestra en la gráfica de la figura (3.23) donde se compara el voltaje simulado con los datos experimentales y se observa el modelo se ajusta a los datos. En la gráfica (3.24) se muestra el error entre el modelo y los datos experimentales. Se calcula el ECM, siendo este de **0.0944**. De igual forma en que en el modelo REM, se calcula ECM en el primer transitorio (5-10 segundos) que corresponde al sobretiro negativo y es igual **0.0244**. El segundo transitorio (10-15 segundos) corresponde a la capacitancia de doble capa y tiene un ECM de **0.031**.

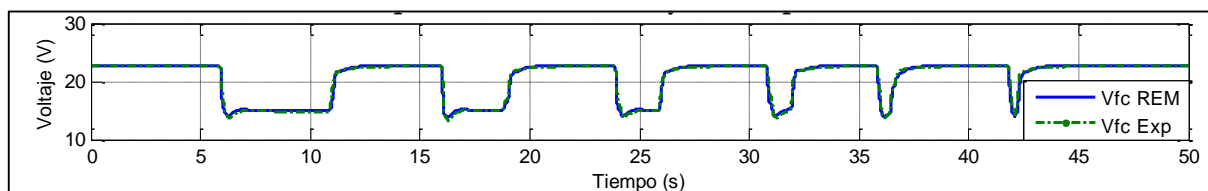


Figura 3.22 Respuesta del modelo REM comparación con datos experimentales.

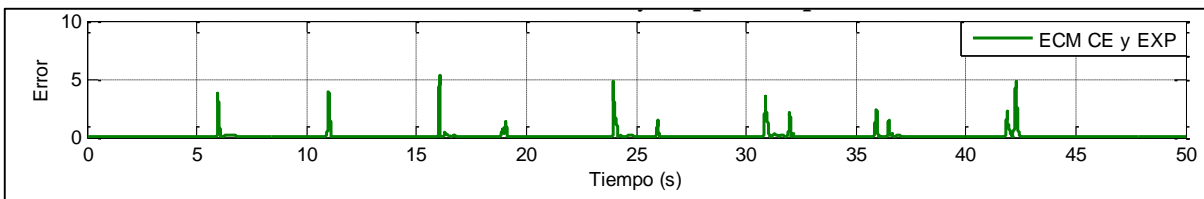


Figura 3.23 Error entre el modelo CE y los datos experimentales.

Rampas de corriente. La segunda prueba realizada fue aplicar rampas de corriente (figura 3.25) al modelo REM y al modelo en circuito equivalente. La figura (3.26) muestra la respuesta del modelo REM comparada con los datos experimentales. Como se observa el modelo es similar a los datos durante el estado estable y esto se aprecia en la gráfica (3.27), donde el error es cercano a cero y crece respecto a cambios transitorios en la respuesta del modelo y los datos. El ECM total del modelo REM es de **0.1424**. De igual manera que en la validación anterior se calcula el ECM del primer transitorio (25-35 segundos) que corresponde a la primera rampa de corriente y que es igual a **0.02704**.

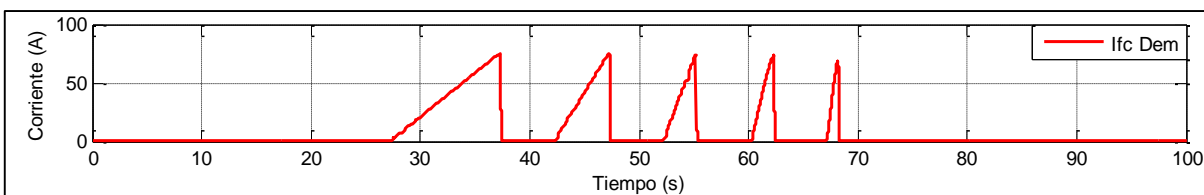


Figura 3.24 Rampas de Corriente.

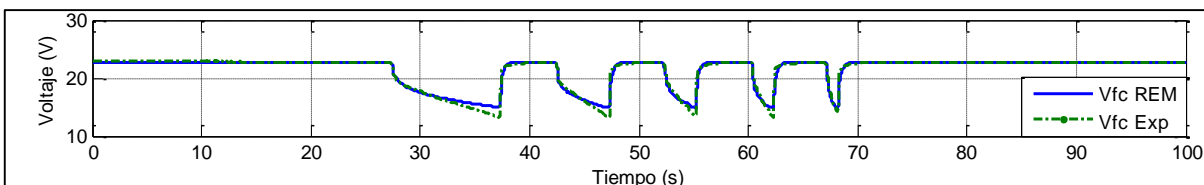


Figura 3.25 Respuesta del modelo REM y datos experimentales.

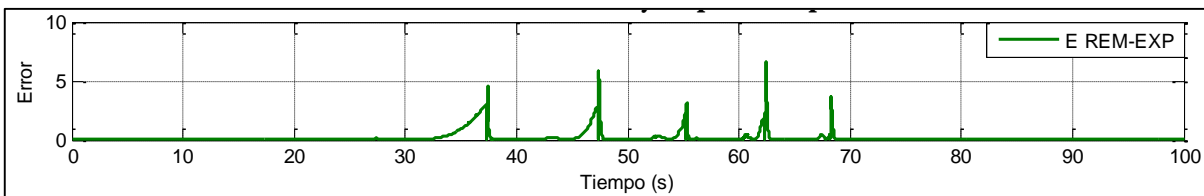


Figura 3.26 Error entre el modelo REM y los datos experimentales.

En la figura (3.28) y (3.29) se muestra la respuesta del modelo por circuito equivalente comprada con los datos experimentales y el error entre ambos modelos, respectivamente. El ECM total entre el CE y los datos fue de **0.1461**. Similar a la validación del modelo REM, se calcula el ECM del primer transitorio (25-35 segundos) y es igual a **0.01305**.

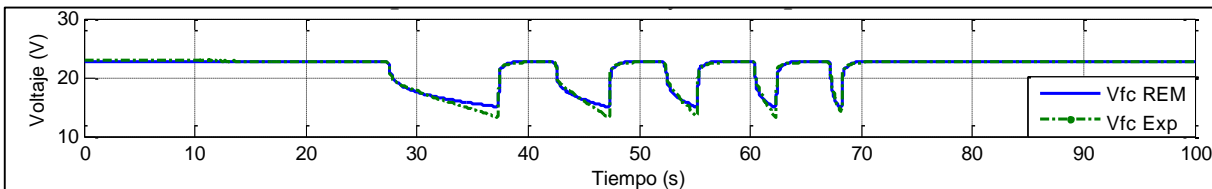


Figura 3.27 Respuesta del modelo CE y datos experimentales.

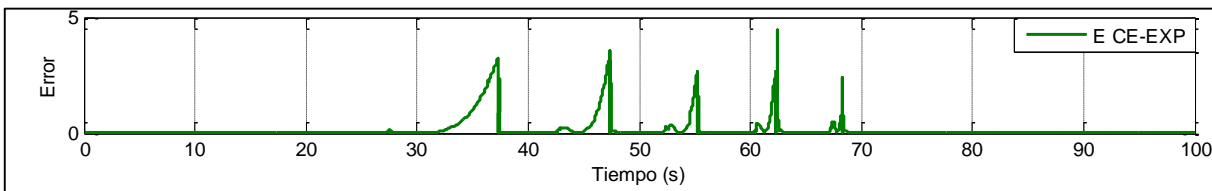


Figura 3.28 Error entre el modelo CE y los datos experimentales.

Ciclo de conducción NEDC. Como última prueba, se aplica al modelo un perfil de corriente con variaciones en la amplitud y tiempo (figura 3.30). Este perfil corresponde al llamado ciclo de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*), el cual representa el ciclo de manejo de un automóvil [33] escalado a 1 kW. En la figura (3.31) se observa la respuesta en voltaje del modelo REM y el voltaje experimental. Como se observa en la figura (3.32) el ECM total entre el modelo y los datos fue de **0.1463**. El ECM en del primer transitorio (400-450 segundos) asociado a la capacitancia de doble capa es de **0.1250**.

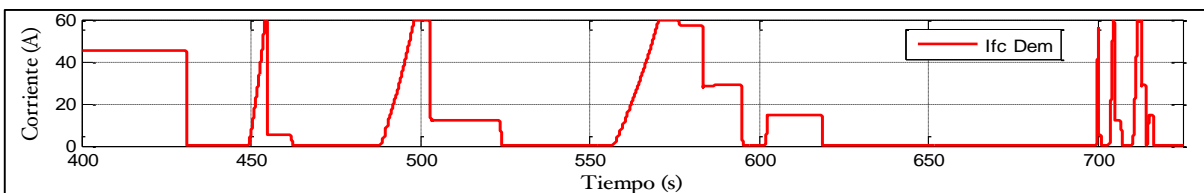


Figura 3.29 Ciclo de conducción NEDC.

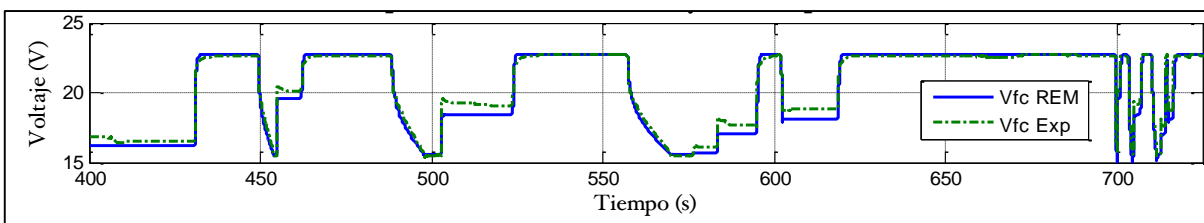


Figura 3.30 Respuesta del modelo REM y datos experimentales.

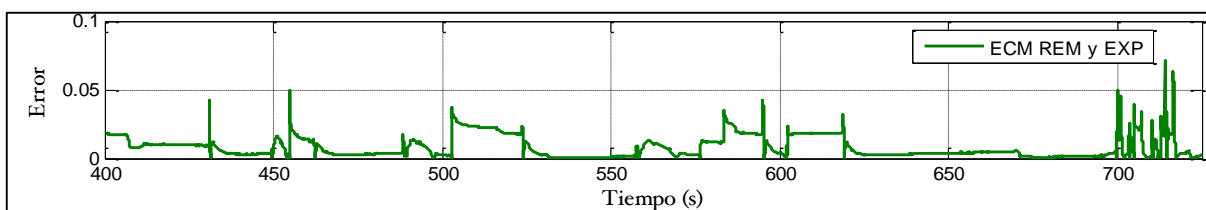


Figura 3.31 Error entre modelo REM y datos experimentales.

Comparando la respuesta del modelo CE con los datos experimentales, se obtiene el comportamiento registrado en la figura (3.33), donde se aprecia que el modelo CE se adapta a los datos de forma similar que el modelo REM. En la figura (3.34) se aprecia que el ECM total del modelo respecto a los datos es de **0.1326**. El ECM en el primer transitorio (400-450 segundos) es de **0.1777**.

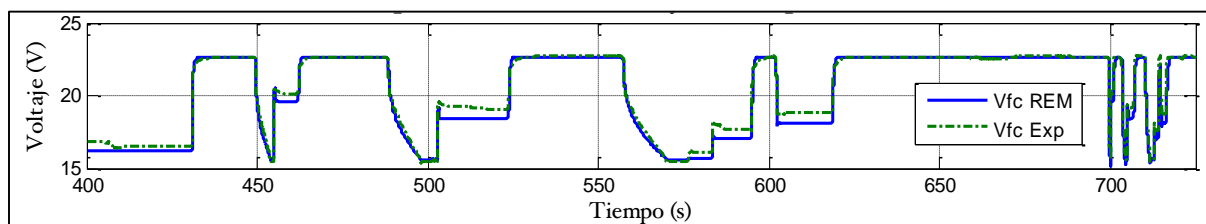


Figura 3.32 Respuesta del modelo CE y datos experimentales.

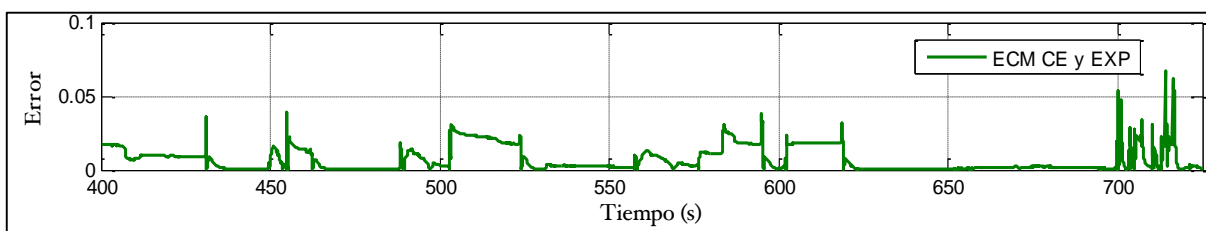


Figura 3.33 Error entre modelo CE y datos experimentales.

De los resultados obtenidos se comprueba que el modelo REM y el modelo CE estiman la dinámica de la celda adecuadamente. Los modelos predicen correctamente el fenómeno de capacitancia de doble capa y sobretiro negativo.

3.3.2 Validación del modelo de supercapacitor

El modelo de supercapacitor se validó comparando la respuesta del modelo REM y del circuito equivalente (CE) con datos experimentales registrados del banco de supercapacitores descrito en las secciones anteriores. Tales datos provienen de mediciones de un ciclo de carga y descarga del supercapacitor.

Ciclo de carga. En la figura (3.35) se observa la corriente de carga aplicada al supercapacitor, es un escalón con una amplitud de 25 A y una duración de 300 segundos. En la figura (3.36) se compara el voltaje que entrega el modelo REM del supercapacitor con el voltaje experimental. Tal y como se observa el modelo reproduce adecuadamente los datos. Esto se confirma con la gráfica (3.37), donde observa el error del modelo. El ECM total entre el modelo y los datos es de **0.141**. El ECM del comportamiento transitorio que corresponde al proceso de carga del supercapacitor es de **0.1071**.

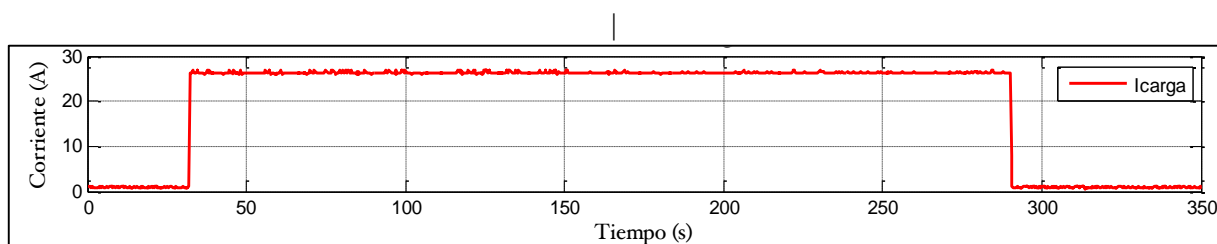


Figura 3.34 Corriente de carga aplicada al supercapacitor.

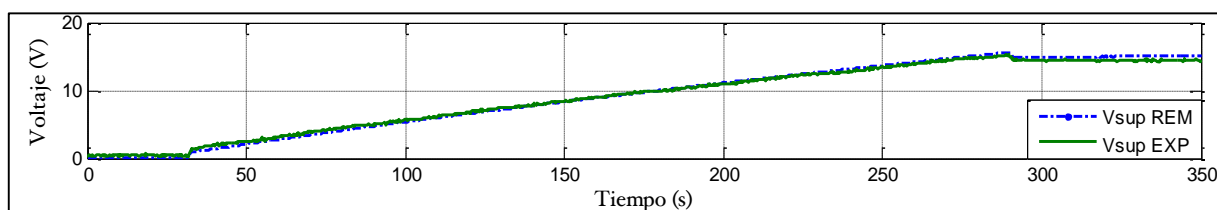


Figura 3.35 Comparación de voltaje modelo REM y experimental (ciclo de carga).

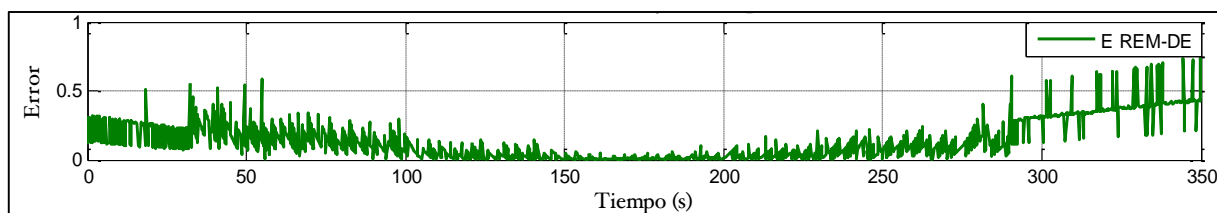


Figura 3.36 Error entre el respuesta de modelo REM y datos experimentales (ciclo de carga).

De igual forma se comparan el voltaje experimental con la respuesta en voltaje del modelo CE en la figura (3.38). El ECM total del modelo CE y los datos fue de **0.2862**, siendo menor que el calculado entre el modelo REM y los datos experimentales (figura 3.39). El ECM del comportamiento transitorio que corresponde al proceso de carga del supercapacitor es de **0.1011**.

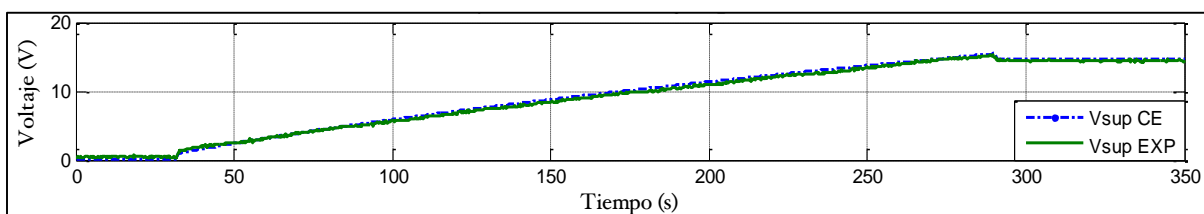


Figura 3.37 Comparación de voltaje modelo CE y experimental (ciclo de carga).

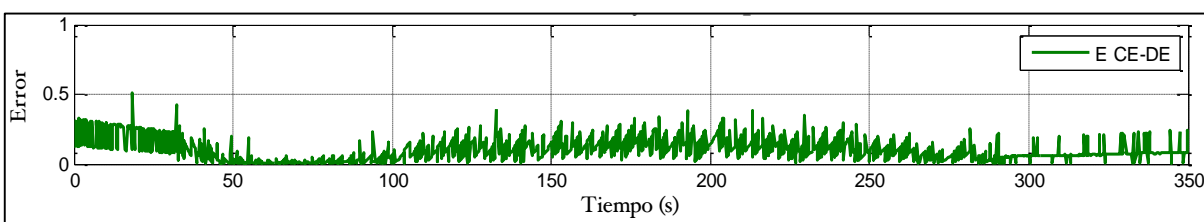


Figura 3.38 Error entre el respuesta de modelo CE y datos experimentales (ciclo de carga).

Ciclo de descarga. De forma similar que la prueba anterior, se aplica una corriente para descargar al supercapacitor, es un escalón negativo con amplitud de 25 A y una duración de 270 segundos (figura 3.40). En la práctica esta prueba es una demanda de corriente al supercapacitor. La respuesta en voltaje del modelo se compara con el voltaje experimental en la figura (3.41), donde se aprecia que la respuesta del modelo se acerca suficientemente a los datos experimentales. El error de predicción se observa en la figura (3.42), este se incrementa con el tiempo, pero el ECM total entre la respuesta del modelo y los datos no es muy alto, tiene un valor de **0.2106**. El ECM del transitorio correspondiente a la descarga del supercapacitor es de **0.1285**.

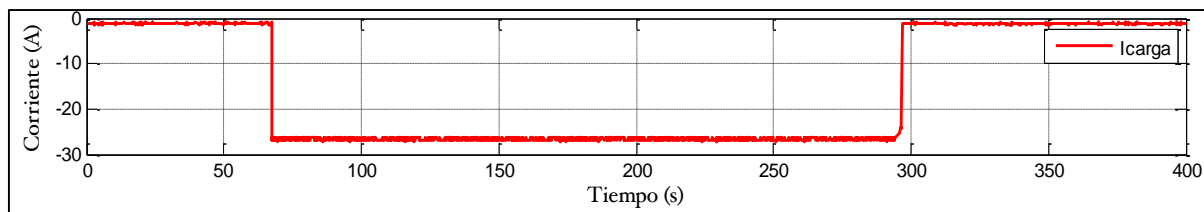


Figura 3.39 Corriente de descarga aplicada al supercapacitor.

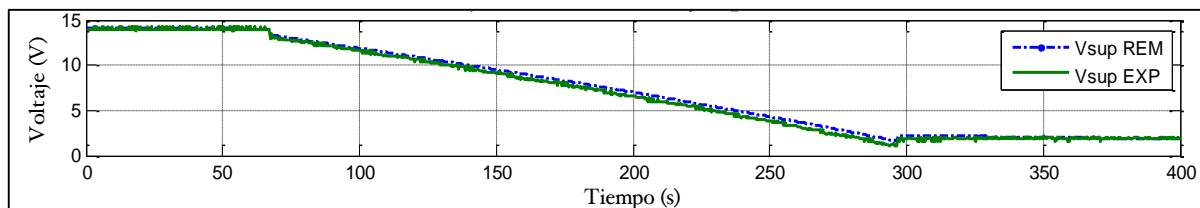


Figura 3.40 Comparación de voltaje modelo REM y experimental (ciclo de descarga).

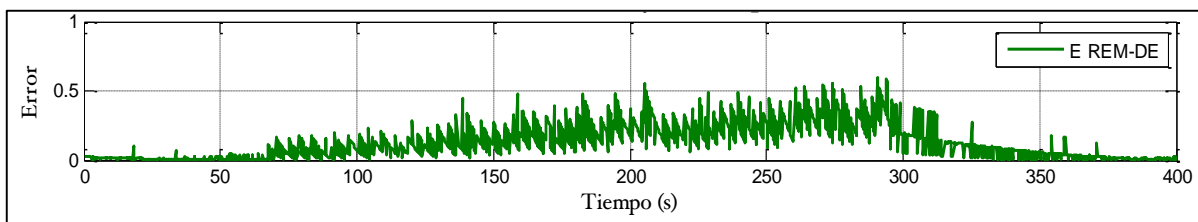


Figura 3.41 Error entre el respuesta de modelo REM y datos experimentales (ciclo de descarga).

En la figura (3.43) se compara la respuesta del modelo CE y el voltaje experimental. El error entre el modelo y los datos es menor comparado con el error del modelo REM. En este caso se obtiene un ECM total de **0.2037**. También se calcula el ECM considerando sólo el transitorio y es igual a **0.1187**.

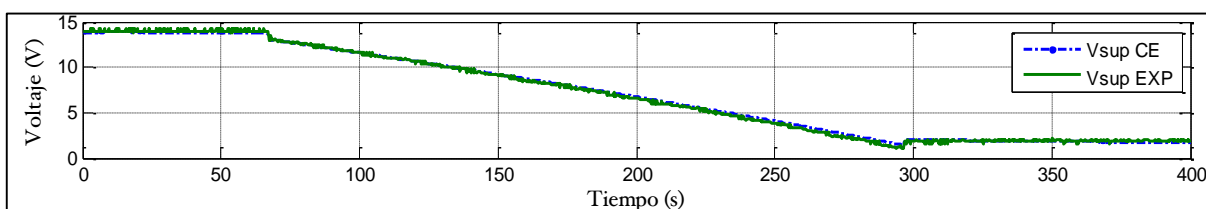


Figura 3.42 Comparación de voltaje modelo CE y experimental (ciclo de descarga).

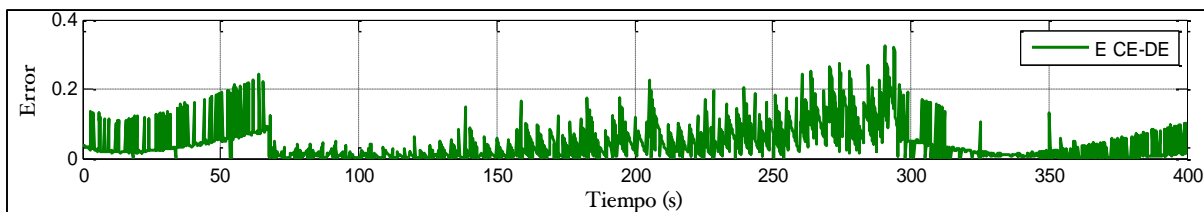


Figura 3.43 Error entre el respuesta de modelo CE y datos experimentales (ciclo de descarga).

Con los resultados obtenidos, se observa que el modelo REM y el modelo CE del supercapacitor proveen respuestas cercanas a las pruebas experimentales y se observa un desempeño aceptable tanto en los ciclos de carga como de descarga.

En conclusión, se observa que el modelo de celda de combustible y el modelado del supercapacitor usando la REM reproducen las dinámicas que se ven reflejadas en los datos experimentales. Se registran errores cercanos a cero en el estado estable y pequeños durante los fenómenos transitorios. Esto permitirá integrar ambos modelos en la simulación de un sistema híbrido.

Capítulo IV. Conexión de celda de combustible y supercapacitor con convertidores

En este capítulo se explica el proceso de integración de los modelos REM de la celda de combustible y del supercapacitor con el modelo de los convertidores. También se presentan los cálculos y consideraciones de diseño para obtener los parámetros de estos últimos así como algunas simulaciones para conocer el comportamiento dinámico de los convertidores conectados a la celda de combustible y al supercapacitor.

4.1 Topología de conexión

En la literatura existen diferentes topologías de convertidores para celdas de combustible y supercapacitores. Estas topologías también dependen de los tipos de convertidores de potencia que adecuan los niveles de voltaje para ambos dispositivos [38], [39], [40]. En la literatura hay algunos trabajos sobre modelado por REM de convertidores de potencia para celdas de combustible y para supercapacitores [41], [42], [43]. En la figura (4.1) se observa la topología usada por Boulon *et al.*,(2008) [20]. Los convertidores de potencia no sólo permiten acondicionar los niveles de voltaje de ambos dispositivos y la integración de ambas dinámicas, sino que también ofrecen protección aislando la carga de las fuentes de energía.

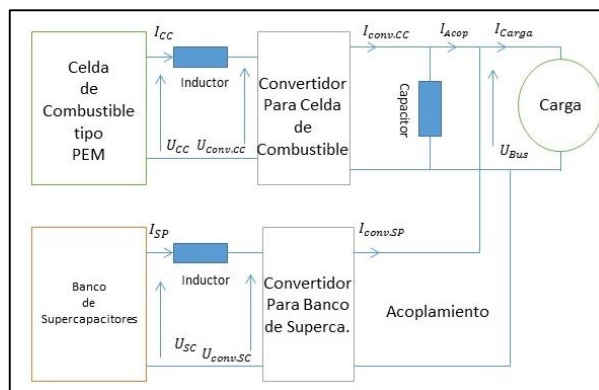


Figura 4.1 Esquema de sistema de alimentación híbrido basado en celdas de combustible [20].

4.1.1 Modelo matemático de convertidores a través de la REM

La simulación del sistema celda de combustible-convertidor - supercapacitor que se presenta en esta sección caracteriza el comportamiento de los convertidores conectados a la celda de combustible y al supercapacitor, así como también el voltaje que entrega el sistema. Es común que los convertidores de potencia se modelen de forma ideal, es decir que no se considere el efecto de la conmutación, pérdidas en los elementos, en los diferentes modos de operación

(elevador, reductor, bidireccional) [18]. En este trabajo se utilizó el modelo REM de los convertidores desarrollado por Boulon *et al.*, (2008) [18], el cual integra circuitos simples con elementos ideales. Después se incorporan los modelos REM de la celda de combustible y del supercapacitor ya probados para el sistema de celdas de combustible Bahia y para el banco de supercapacitores Maxwell®.

Antes de simular el sistema completo, primero se analizó la dinámica de la celda de combustible con un convertidor elevador. Posteriormente se incorporó la dinámica del supercapacitor con su convertidor, el cual opera de forma ideal como bidireccional. Esto se realizó con el objetivo de determinar los parámetros correspondientes al modelo.

En la literatura existen diferentes métodos para el diseño de convertidores [44], [45]. Estos dependen del voltaje de alimentación, del voltaje de salida, de la máxima corriente en el inductor y de la potencia que se desea suministrar. Tomando en cuenta lo anterior, se diseñó el convertidor para la celda de combustible y se formuló un modelo promediado en espacio de estados para simular la dinámica del convertidor. Las consideraciones de diseño fueron las siguientes:

- Voltaje de alimentación (V_{in}): éste se definió considerando el voltaje que la celda entrega a la máxima demanda de potencia. En la figura (4.2) se obtiene este valor a partir de la curva de polarización.
- Voltaje de salida (V_{out}): De acuerdo al criterio de Wang *et al.*, (2009) [45], afirman que para un convertidor elevador (*Boost*) es conveniente establecer un ciclo de trabajo de aproximadamente el 55%, es decir duplicar el voltaje de entrada aproximadamente. Por lo tanto, como se tiene un voltaje de entrada de 15 V, la razón de elevación da un voltaje de 30. En la práctica este valor no es considerado un valor estándar por lo tanto el voltaje se establece en 36 V y que corresponde a la alimentación de algunos motores eléctricos que pueden servir en la construcción de vehículos híbridos.

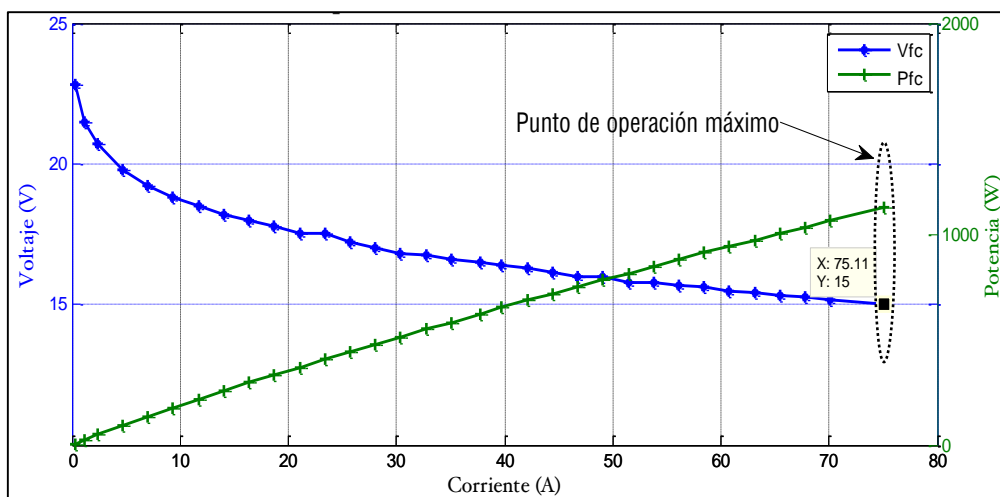


Figura 4.2 Punto máximo de operación de celda de combustible.

Tomando en cuenta los criterios de diseño, los cálculos para obtener los parámetros del convertidor fueron los siguientes:

Cálculo de inductancia L_{dd} :

La resistencia de carga equivalente en el punto de operación es:

$$R_{con} = \frac{v_{dd_in}^2}{P_{dd,N}} = \frac{36^2}{1165} = 1.1124 \Omega \quad (4.1)$$

El ciclo de trabajo es:

$$D = 1 - \frac{v_{dd_in}}{v_{dd_out}} = \frac{15}{36} = 0.5833 \quad (4.2)$$

$$v_{dd_out} = \frac{v_{dd_in}}{1-D} = \frac{15}{1-0.5833} = 35.9971 \quad (4.3)$$

Por lo anterior, la máxima corriente en el inductor es:

$$I_{Ldd} = \frac{v_{dd_in}}{(1-D)^2 R_{con}} = \frac{15.22}{(1-0.5772)^2 \times 1.1124} \approx 75.5440 \quad (4.4)$$

De acuerdo con las especificaciones de diseño para el máximo pico de corriente en el inductor (menor al 1 %), se tiene que:

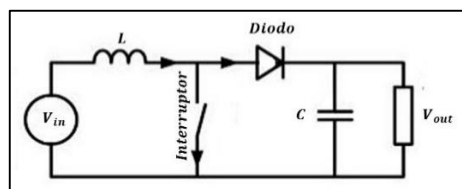
$$\frac{\Delta I_{Ldd}}{I_{Ldd}} = \frac{D(1-D)^2}{f_s L_{dd}} \leq 1\% \rightarrow L_{dd} \geq \frac{D(1-D)^2 R}{f_s} \quad (4.5)$$

Se escoge un valor del inductor en $L_{dd} = 0.00286$

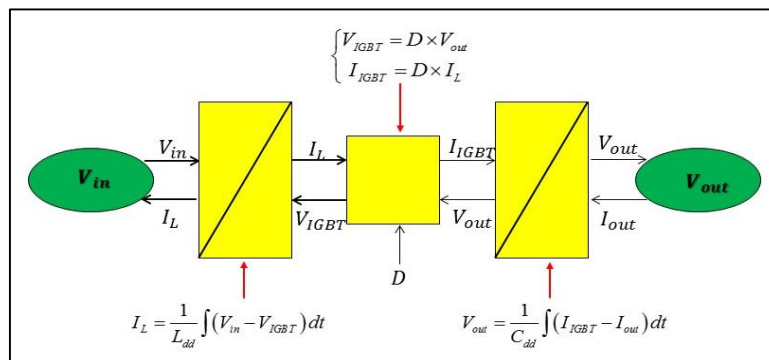
Cálculo de la capacitancia C_{dd} :

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R_{con} C_{dd} f_s} \leq 1\% \rightarrow C_{dd} \geq \frac{D}{0.01 R_{con} f_s} = 0.0026 \quad (4.6)$$

La REM del convertidor elevador se obtiene seleccionando adecuadamente los bloques que modelan el comportamiento de cada elemento (figura 4.3). Dos elementos de acumulación modelan la dinámica del inductor L y del capacitor C respectivamente. Un elemento de conversión de energía modela el comportamiento del interruptor, el cual se considera ideal en esta representación. Es decir, no se tienen pérdidas por conmutación. El voltaje de alimentación y el voltaje regulado se representan por fuentes de energía.



(a)



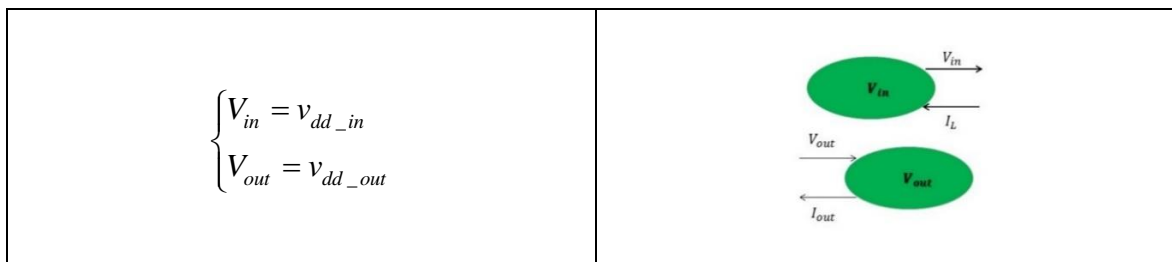
(b)

Figura 4.3 Convertidor elevador (a). REM de convertidor elevador (b).

En la tabla (4.1) se enlistan las ecuaciones para cada elemento del convertidor y su representación en REM. Como se observa, cada elemento tiene sus respectivas variables de acción y de reacción, las cuales corresponden a las entradas y salidas de las ecuaciones.

Tabla 4.1 Ecuaciones del convertidor elevador y su REM.

$I_{Ldd} = \frac{1}{L_{dd}} \int (V_{in} - V_{IGBT}) dt$	
$V_{out} = \frac{1}{C_{dd}} \int (I_{IGBT} - I_{out}) dt$	
$\begin{cases} V_{IGBT} = D \times V_{out} \\ I_{IGBT} = D \times I_{Ldd} \end{cases}$	



Para verificar la respuesta del modelo REM, este se compara con la respuesta del modelo promediado en espacio de estados del convertidor elevador. El modelo promediado se obtuvo del trabajo realizado por Wang *et al.*, (2009) y se muestra a continuación.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bv_{dd_in} \\ v_{dd_out} = Cx \end{cases} \quad (4.7)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-D)}{L_{dd}} \\ \frac{1-D}{C_{dd}} & \frac{-1}{R_{car}C_{dd}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{dd}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0] \quad (4.8)$$

En la figura (4.4) se compara la respuesta del modelo REM y del modelo promediado. Se observa que coinciden perfectamente. La figura (4.5) muestra la unión del convertidor con la celda de combustible.

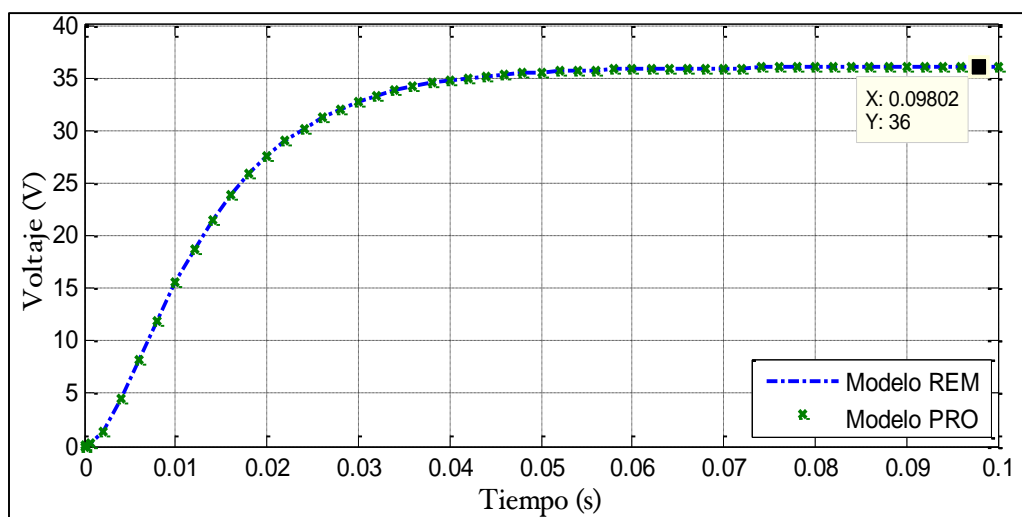


Figura 4.4 Comparación de respuesta de convertidor elevador en modelo promediado y modelo REM.

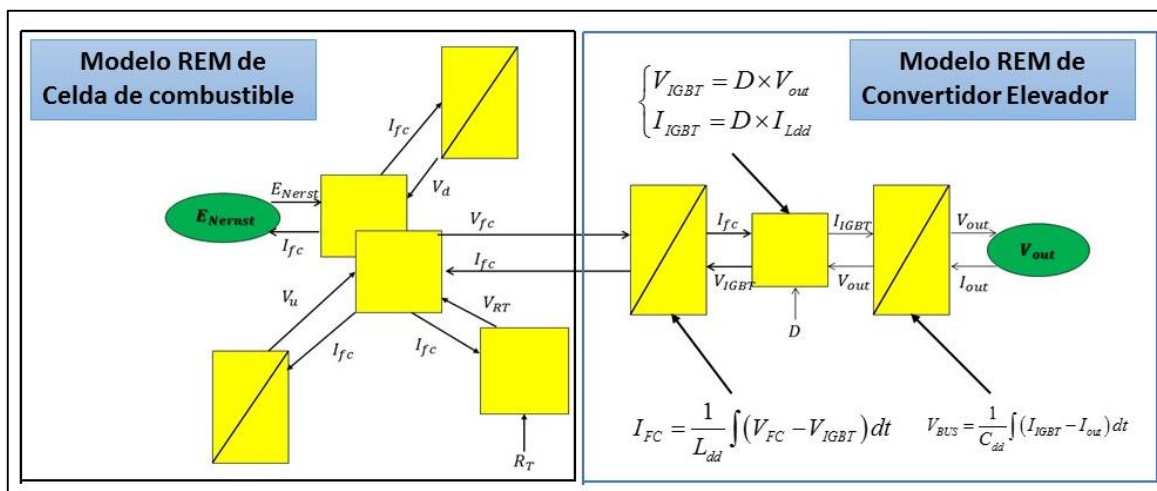


Figura 4.5 REM de celda de combustible con convertidor elevador.

Posteriormente se simula el modelo REM de la celda de combustible con el convertidor asociado a ésta (figura 4.5) para conocer su comportamiento, aplicando una carga resistiva como demanda de corriente.

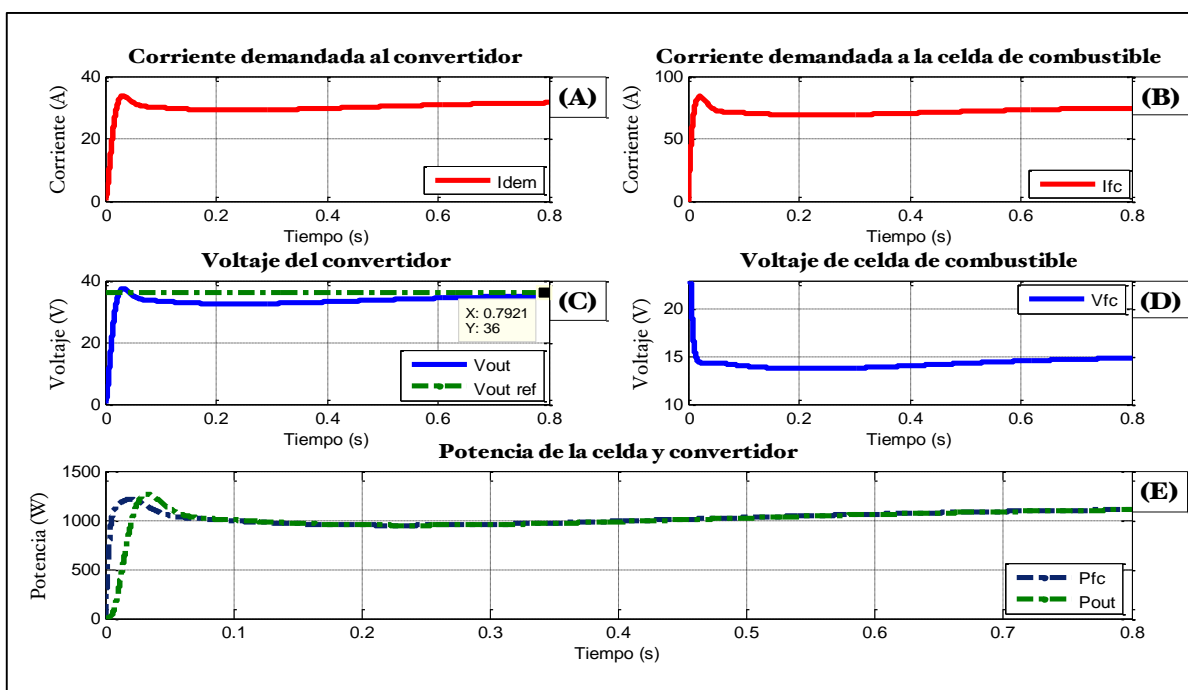


Figura 4.6 Respuesta en lazo abierto de celda de combustible y convertidor.

En la figura (4.6) se aprecia la respuesta del sistema en lazo abierto ante una demanda de corriente con una carga resistiva (figura 4.6 A). En la gráfica (4.6 C) y (4.6 D), se observa la repuesta en voltaje del convertidor y de la celda de combustible. El voltaje que el convertidor entrega alcanza el valor de referencia. En la gráfica (4.6 B), se muestra la corriente demandada a la celda de combustible. Finalmente en la gráfica (4.6 E), se comparan la potencia que genera

la celda de combustible con la potencia en la salida del convertidor. Como se mencionó en los párrafos anteriores el modelo de convertidores usando la REM se realiza de forma ideal, por lo tanto no se tienen pérdidas en la potencia que el convertidor entrega, siendo igual que la potencia de la celda de combustible.

Para analizar el comportamiento del sistema completo, se simuló el sistema celda de combustible-supercapacitor-convertidores. El convertidor del supercapacitor opera como bidireccional, sus parámetros son similares al del convertidor elevador, puesto que el voltaje que el supercapacitor genera es similar al voltaje de la celda en el máximo punto de operación. Sin embargo se considera un voltaje inicial en el supercapacitor de 14 V, siendo este el 95% del voltaje total que el supercapacitor puede generar.

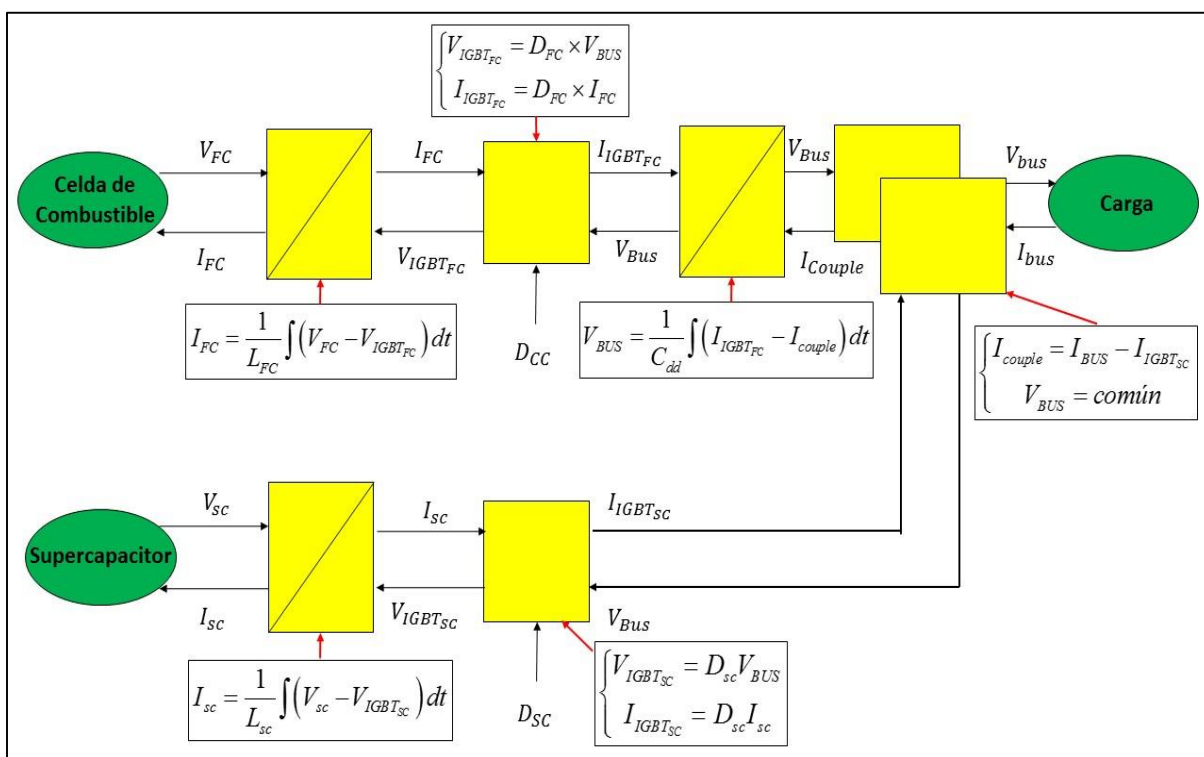
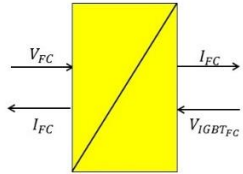
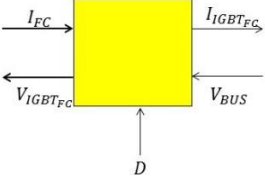
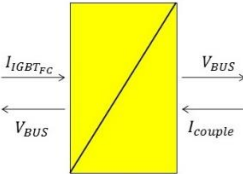
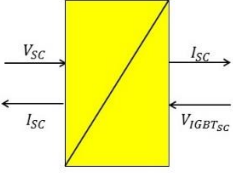
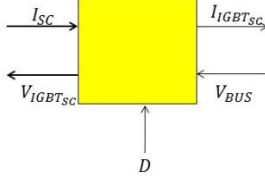
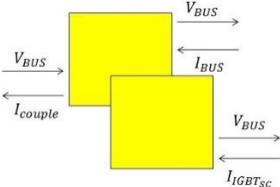


Figura 4.7 REM de sistema híbrido.

En la figura (4.7) se muestra la REM del sistema completo. Para propósitos de simplificación en la figura, la celda de combustible y el supercapacitor se representan por fuentes de energía. En la simulación, tal y como se reporta en el Anexo (II), se conectan los modelos de celda de combustible y del supercapacitor en REM. Los inductores y el capacitor se representan como elementos de acumulación y los convertidores como elementos de conversión de energía. La conexión en paralelo, entre el capacitor y el convertidor del supercapacitor se modela con un elemento de acoplamiento monofísico. En la tabla (4.2) se presentan las ecuaciones del sistema completo y su representación en REM.

Tabla 4.2 Ecuaciones del sistema híbrido y su REM.

$I_{FC} = \frac{1}{L_{FC}} \int (V_{FC} - V_{IGBT_{FC}}) dt$	
$\begin{cases} V_{IGBT_{FC}} = D_{FC} \times V_{BUS} \\ I_{IGBT_{FC}} = D_{FC} \times I_{FC} \end{cases}$	
$V_{BUS} = \frac{1}{C_{dd}} \int (I_{IGBT_{FC}} - I_{couple}) dt$	
$I_{SC} = \frac{1}{L_{SC}} \int (V_{SC} - V_{IGBT_{SC}}) dt$	
$\begin{cases} V_{IGBT_{SC}} = D_{SC} \times V_{BUS} \\ I_{IGBT_{SC}} = D_{SC} \times I_{SC} \end{cases}$	
$\begin{cases} I_{couple} = I_{BUS} - I_{IGBT_{SC}} \\ V_{BUS} = \text{común} \end{cases}$	

Para conocer el comportamiento del sistema se aplica una demanda de corriente constante. La figura (4.8) muestra el comportamiento del sistema. Como se observa en la gráfica (4.8 A), el voltaje que el sistema entrega (línea verde) tiene un comportamiento transitorio con oscilaciones muy grandes que posteriormente se van atenuando hasta establecerse aproximadamente en el valor de diseño (36 V). En la figura (4.8 B) se observa el comportamiento de la corriente y el voltaje en la celda de combustible. El voltaje de la celda de combustible (figura (4.8 B), línea verde) tiende al valor de 15 V con un comportamiento oscilatorio en los primeros segundos de la simulación, sin embargo se observa un decaimiento debido a que la corriente demandada a la celda incrementa respecto al tiempo (línea azul). Finalmente, la figura (4.8 C) muestra el comportamiento del voltaje en el supercapacitor. La línea azul representa el la corriente demandada al supercapacitor y la línea verde el voltaje que el supercapacitor entrega. El decaimiento que este último indica que el supercapacitor está en modo de descarga.

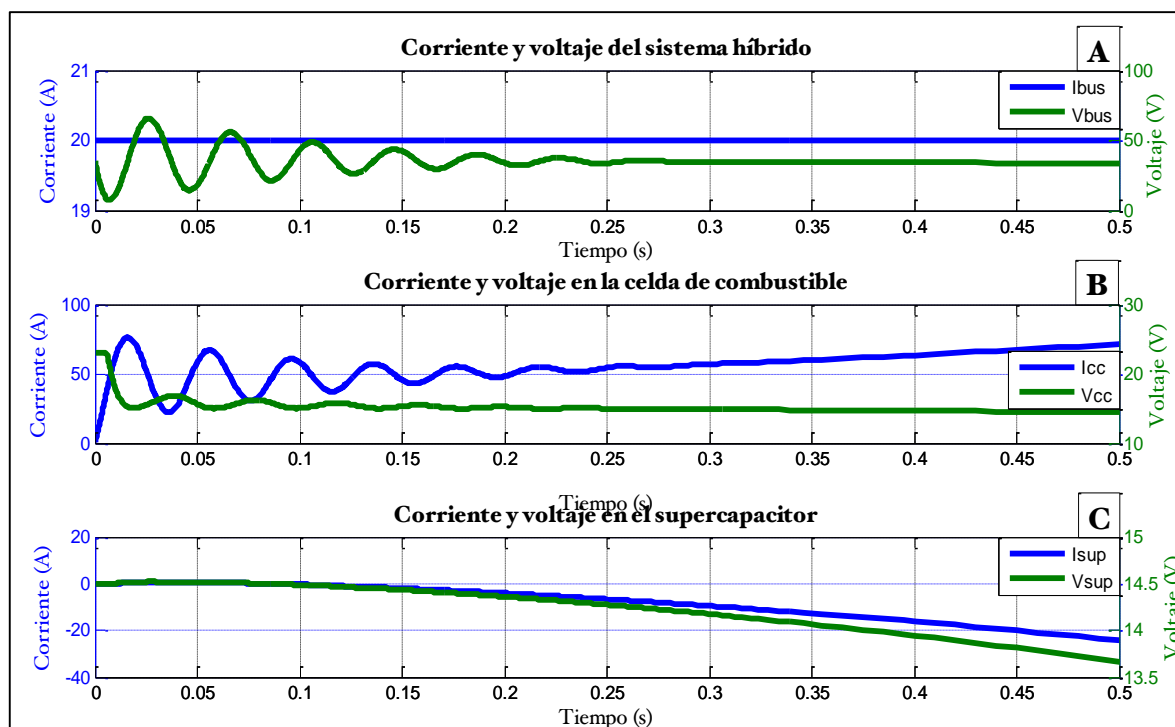


Figura 4.8 Respuesta del sistema híbrido en lazo abierto.

En conclusión, tal y como se observó anteriormente en los resultados obtenidos en simulación de la celda con el convertidor elevador y del sistema completo fue posible integrar al dinámica de los tres dispositivos para forma lo que será el sistema híbrido a través de la REM considerando elementos ideales pero que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema.

En el caso de la celda operando sólo con el convertidor elevador se observó que el voltaje que el convertidor entrega de acuerdo con la demanda de corriente realizada llega al valor de diseño. No se realizaron variaciones en la corriente demandada al convertidor puesto que es necesario establecer un control que permita mantener el voltaje en la salida en el valor de diseño

y la corriente que se le demanda a la celda de combustible entre los rangos de operación adecuados.

Finalmente, para el caso del sistema completo, el comportamiento registrado establece la necesidad de definir una estrategia de control que permita operar a la celda de combustible y al supercapacitor de acuerdo con las necesidades de la carga demandada al sistema, es decir definir un criterio para decidir cuándo operara la celda de combustible y cuando el supercapacitor.

Capítulo V. Control de sistema híbrido

En este capítulo se describe la estrategia de control para administrar la carga en el sistema híbrido usando el método por modelo inverso descrito en el capítulo II. En la celda de combustible se asume un control ideal de temperatura, así como del suministro de reactantes y de la humedad relativa. El voltaje de la celda indirectamente se controla de acuerdo a lazo de control que se establece en el convertidor conectado a esta. En el supercapacitor no se considera ningún lazo de control, pero se controla el voltaje de operación con un control de voltaje en el convertidor. El control global define la estrategia de administración de carga del sistema híbrido.

5.1 Sistema de alimentación híbrido

El sistema de alimentación híbrido considerado (figura 5.1) se compone de una fuente primaria de energía, que es una celda de combustible tipo PEM y de un sistema de asistencia que consta de un supercapacitor. La incorporación de una segunda fuente se realiza incluyendo convertidores de potencia para ambos dispositivos. El control de administración de carga debe permitir la operación segura y eficiente del sistema celda de combustible-supercapacitor-convertidores de potencia.

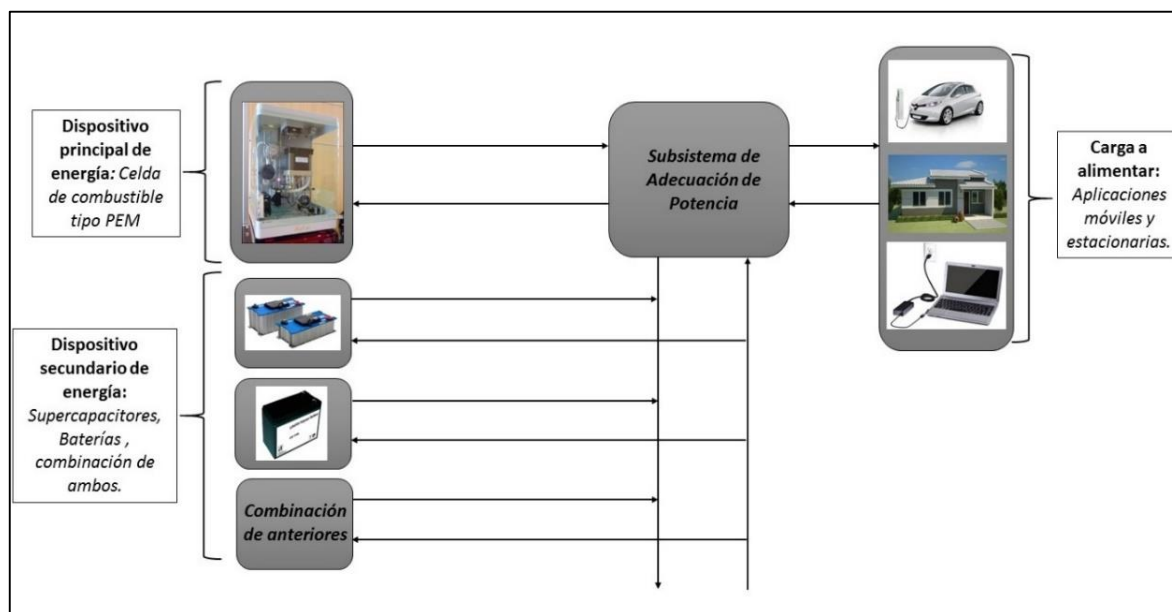


Figura 5.1 Estructura de sistema híbrido.

La estrategia de control global tiene como objetivo regular el voltaje que el sistema híbrido entrega, dividiendo la carga entre la celda de combustible y el supercapacitor, siendo éste el lazo de control principal y tiene como variable controlada el voltaje de salida.

También, se establecen dos lazos de control secundarios, que de acuerdo con la repartición de la carga realizada por el lazo de control global, regulan la corriente que se le demanda tanto a la celda de combustible como al supercapacitor. Esto se logra modificando el ciclo de trabajo de los convertidores, tomando en cuenta las restricciones de cada dispositivo. En estos lazos de control, se tiene como variable controlada la corriente y como variable manipulada el ciclo de trabajo de ambos convertidores. El voltaje de salida del sistema híbrido es 36 V, tal como se explicó en el capítulo IV.

En las siguientes secciones se muestra la metodología del control de carga por modelo inverso en el sistema híbrido conteniendo los lazos de control mencionados anteriormente, y se presentan los resultados de las pruebas realizadas en simulación ante diferentes perfiles de carga. Primero se prueba un lazo de control para la celda de combustible con el convertidor elevador y posteriormente el control del sistema híbrido.

5.1.1 Lazo de control del convertidor asociado a la celda de combustible

El lazo de control en el convertidor se hace usando la técnica del modelo inverso y tiene como objetivo controlar el voltaje de salida y la corriente demandada a la celda. Para esto, se toma el ciclo de trabajo del convertidor como variable manipulada y como variable controlada la corriente que se le demanda a la celda. De acuerdo con la metodología del modelo inverso descrita en el Capítulo II, al estar definido el modelo REM, e identificada la variable controlada y manipulada, se hace la inversión de los elementos del modelo. En la figura (5.2), la flecha roja indica las variables que definen el lazo de control por modelo inverso.

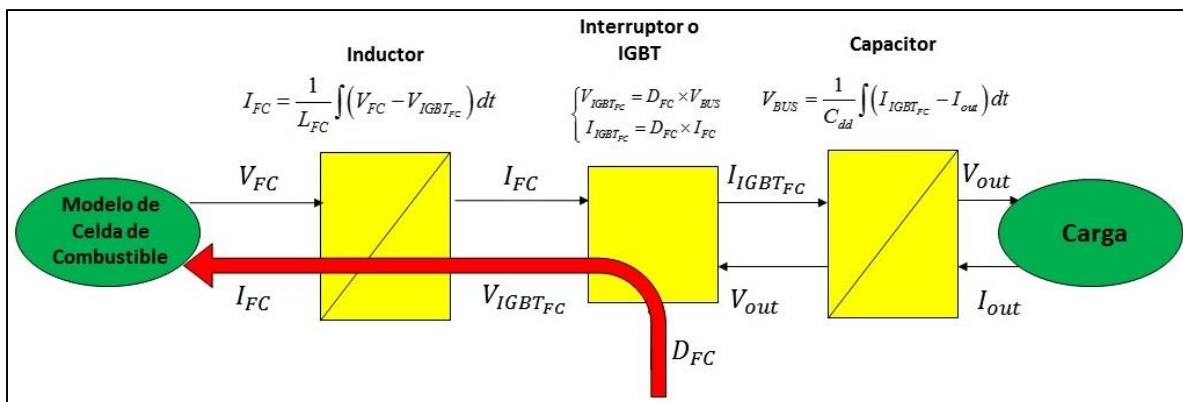


Figura 5.2 Variables a invertir en el convertidor asociado a la celda de combustible.

De acuerdo con la figura (5.2), se invertirán dos elementos: el inductor, modelado como un elemento de acumulación de energía y el interruptor del convertidor modelado como un elemento de conversión monofísico. Una relación causal o dinámica está definida para la corriente en el inductor y una relación estática para el ciclo de trabajo en el interruptor. La ecuación (5.1) muestra la relación dinámica y la ecuación (5.2) la relación estática.

$$I_{FC} = \frac{1}{L_{FC}} \int (V_{FC} - V_{IGBT_{FC}}) dt \quad (5.1)$$

$$V_{IGBT_{FC}} = D_{FC} \times V_{BUS} \quad (5.2)$$

La inversión de una relación dinámica requiere la presencia de un controlador. A partir de la ecuación (5.1) se establece la ecuación de inversión (5.3) con un controlador PID denotado por C . En la tala (5.1) se muestran los parámetros de este controlador.

$$V_{IGBT_{FCmed}} = C [I_{FCref} - I_{FCmed}] + V_{FCmed} \quad (5.3)$$

La inversión de una relación estática se realiza de forma directa y no se consideran controladores. Por lo tanto, la ecuación de inversión (5.4) se obtiene de la ecuación (5.2):

$$D_{FCmo} = \frac{V_{IGBT_{FCmo}}}{V_{out}} \quad (5.4)$$

En la figura (5.3), se muestra el diagrama de bloques del lazo de control por modelo inverso para el convertidor de la celda de combustible.

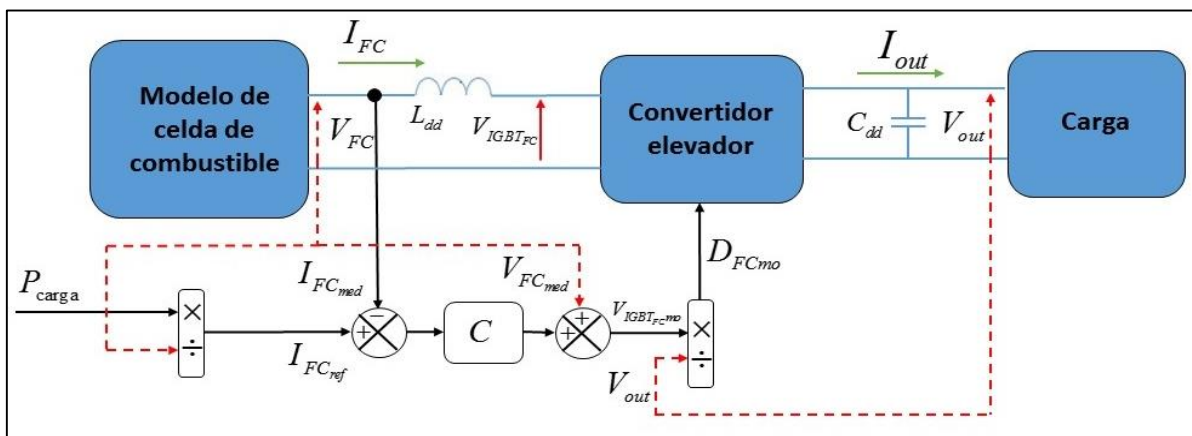


Figura 5.3 Diagrama de bloques de control del convertidor de calda de combustible.

Tabla 5.1 Parámetros del controlador PID.	
Ganancia proporcional (K_p)	-2821.69409919689
Ganancia integral (K_i)	177233.292515025
Ganancia derivativa (K_d)	1.78844004461672e ⁻⁷

En la figura (5.4), se muestra la REM del convertidor con la celda de combustible y el controlador por modelo inverso. Los bloques azules representan la inversión de los elementos y

dentro de cada uno de ellos se encuentran las ecuaciones de inversión establecidas anteriormente.

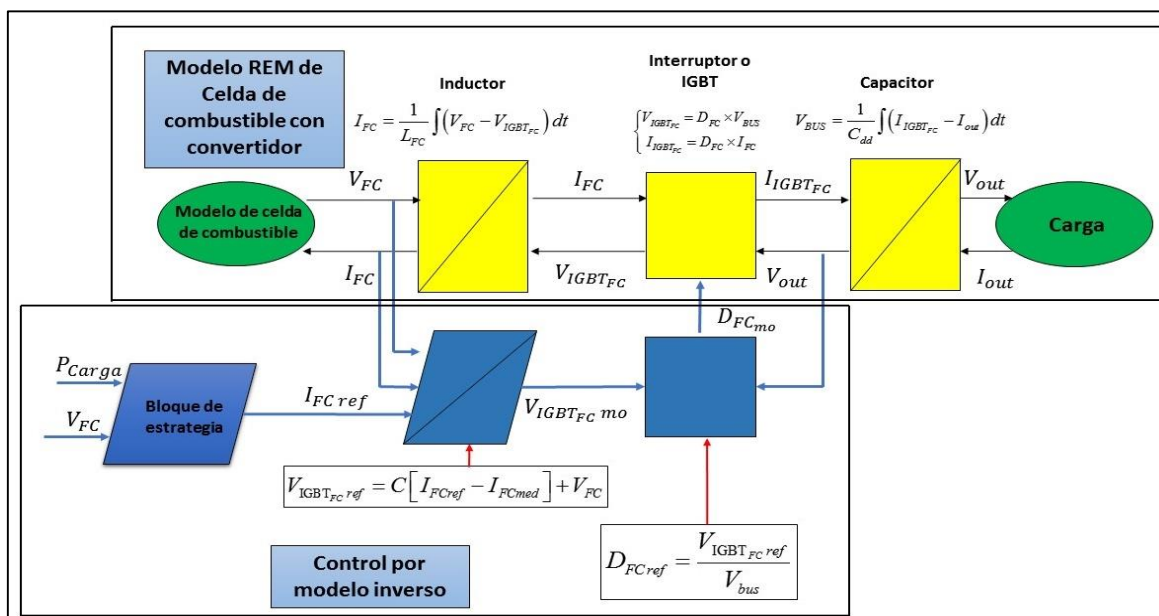


Figura 5.4 Implementación de estrategia de control por modelo inverso al conjunto celda-conversor.

Para conocer el desempeño del controlador en el sistema celda combustible-conversor, se aplica un perfil de carga, el cual consiste en escalones de corriente.

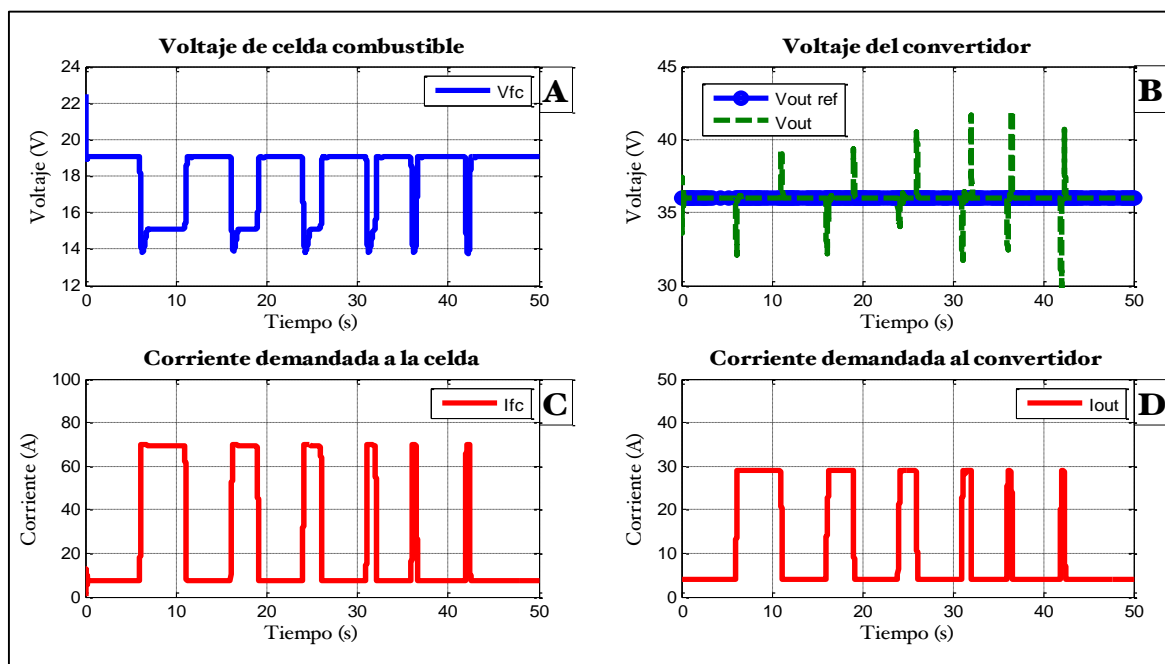


Figura 5.5 Respuesta de celda-conversor con control inverso.

En la figura (5.5), se observa la respuesta del sistema. La gráfica (5.5 B) muestra el voltaje del convertidor. Los transitorios oscilan en un rango de ± 6 Volts. El voltaje en la celda de combustible (gráfica 5.5 A) varía de acuerdo con la corriente demandada permitiendo al voltaje moverse en un rango de 15 a 19 Volts aproximadamente. También se observa que el fenómeno de sobretiro negativo está presente. Las gráficas (5.5 C) y (5.5 D) muestran la corriente demandada a la celda de combustible y la corriente demandada al convertidor respectivamente. En la figura (5.6 A), la potencia que entrega la celda y el convertidor son prácticamente iguales y en la figura (5.6 B), se observa el comportamiento del ciclo de trabajo debido a la acción del control.

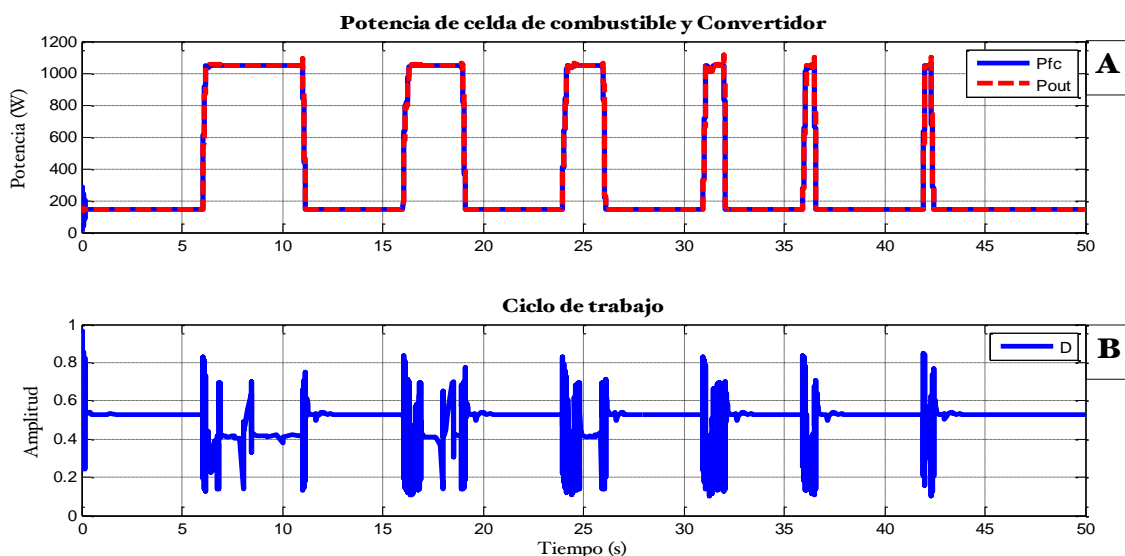


Figura 5.6 Respuesta en potencia y ciclo de trabajo del convertidor.

Como se observa en las gráficas, el controlador regula el voltaje de salida del convertidor ante variaciones en la carga. Este primer ejercicio muestra el control en el convertidor de la celda de combustible. Falta incorporar el control para el convertidor asociado al supercapacitor y el control global para la administración de carga.

5.1.2 Estrategia de administración de carga

El control global del sistema híbrido debe satisfacer las necesidades de una carga, repartiendo esta demanda entre ambos dispositivos. Por lo tanto, se establece una estrategia de administración de carga entre la celda de combustible y el supercapacitor. En la literatura se han propuesto diversas estrategias de administración de carga para un sistema híbrido. Algunos autores proponen diversos criterios para manejar las fuertes en un sistema híbrido [29], [46], [47].

En esta investigación, la administración de carga entre la celda de combustible y el supercapacitor consiste en establecer una división de frecuencias de la potencia demandada al sistema, es decir la potencia de carga, por medio de un filtro *pasabajas* de primer orden (figura

5.7). Los componentes frecuenciales altos de la carga serán enviados al supercapacitor y los menores a la celda de combustible. Con esta repartición de la carga se buscan los siguientes beneficios:

- Eliminar cambios abruptos en la corriente demandada a la celda de combustible, considerando que la dinámica de la celda de combustible es más lenta que la del supercapacitor.
- Suprimir el fenómeno de sobretiro negativo.
- Disminuir el consumo de reactantes en la celda.

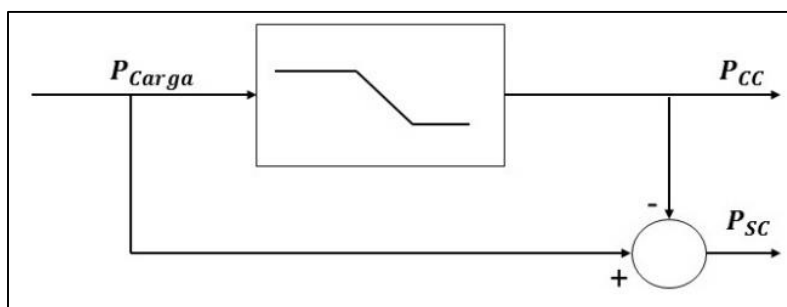


Figura 5.7 Estrategia de administración de energía.

El primer paso es establecer una frecuencia de corte para el filtro. La frecuencia de corte se determinó haciendo un análisis en frecuencia de la respuesta en voltaje y potencia de la celda ante una demanda de corriente. Este análisis consiste en obtener el espectro de frecuencias de las señales de voltaje y potencia, las cuales se muestran en la figura (5.8 a). Se grafica el voltaje de la celda (línea azul), la corriente demandada (línea roja) y la potencia del apilamiento (línea verde) tanto en gráficas temporales, como su espectro en frecuencias (figura 5.8 b). Del análisis en frecuencia de estas gráficas, se propone considerar un ancho de banda de 0 a 0.2 Hertz como una zona con componentes frecuenciales altos.

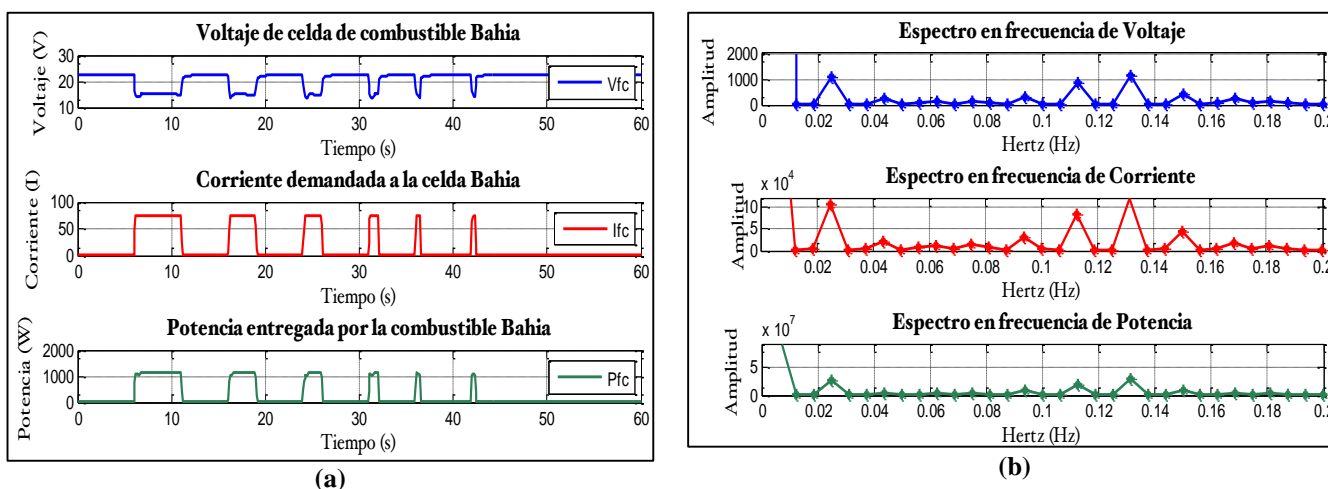


Figura 5.8 Análisis frecuencial: (a) datos de la celda de combustible, (b) espectro en frecuencias.

Se escoge una frecuencia de corte (f_c) de 0.2 Hertz para el filtro, el cual permite tener una corriente de referencia para la celda combustible capaz de respetar los criterios mencionados anteriormente y mantener un estado de carga/descarga para el supercapacitor que no excede los límites de operación. Esto se verá en la sección de implementación del sistema híbrido.

Se calcula la constante de tiempo del filtro el cual tiene la siguiente función de transferencia:

$$F(s) = \frac{1}{Ts + 1} \tag{5.5}$$

Donde T se calcula de acuerdo con la ecuación (5.6). En la figura (5.9) se observa el diagrama de Bode del filtro *pasabajas*, donde a partir de -3dB se observa la frecuencia de corte establecida.

$$T = \frac{1}{2\pi f_c} = \frac{1}{2 \times \pi \times 0.2} = 0.7957 \tag{5.6}$$

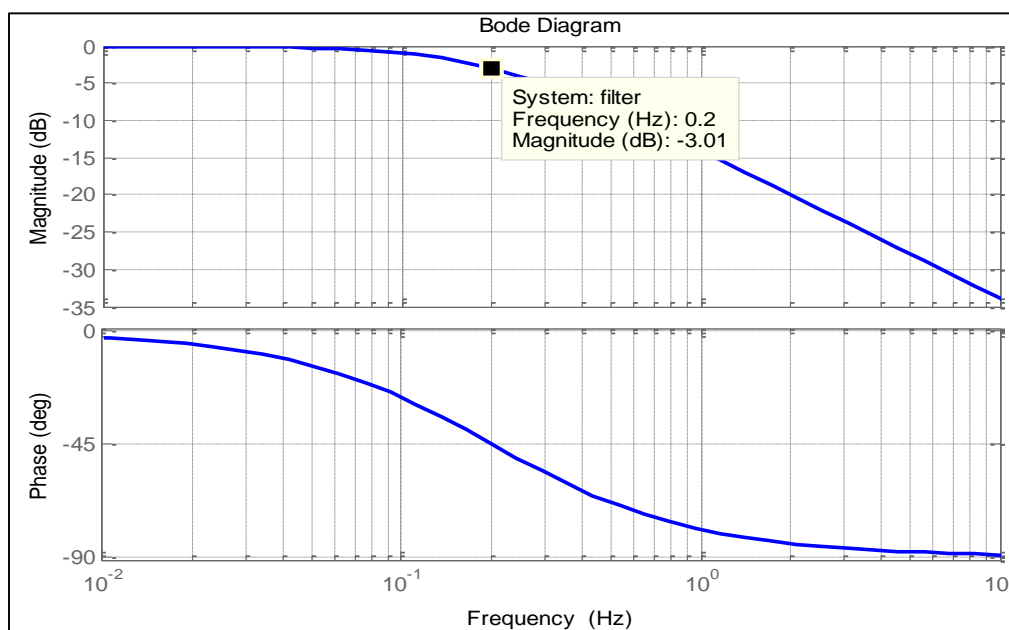


Figura 5.9 Diagrama de bode del filtro *pasabajas*.

Con el fin de cuantificar en términos de porcentaje la cantidad de carga que consume la celda de combustible y el supercapacitor respectivamente, en función de la frecuencia de corte elegida, se introduce un perfil de carga al filtro *pasabajas* y en la figura (5.10) se muestra el porcentaje de la carga dividida por la acción del filtro. En la gráfica (5.10 A) línea azul representa la potencia que se le demanda a la celda de combustible y la línea verde la potencia que cubre el supercapacitor. Se observa que la mayor parte de la energía va dirigida a la celda

de combustible y el restante es absorbido por el supercapacitor. La celda de combustible provee entre 80 y 100% de la potencia demandada, el supercapacitor provee no más del 20% en las pruebas que se consideraron hasta el momento.

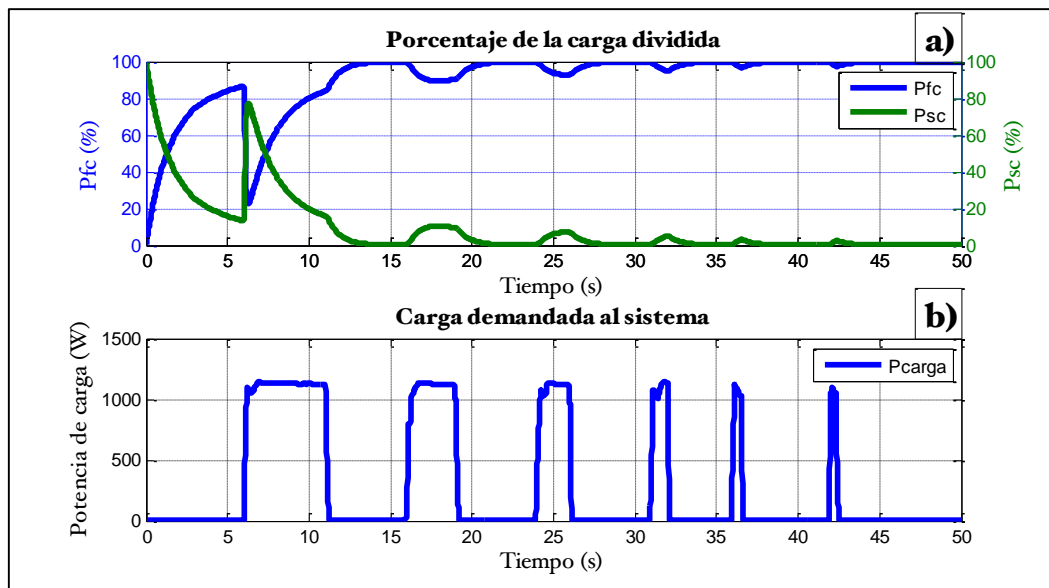


Figura 5.10 Porcentaje de división frecuencial de la carga.

La estrategia de administración de carga se implementa tal y como se observa en la figura (5.11). En función de la potencia de la carga (P_{Carga}), el voltaje de la celda de combustible (V_{FC}) y el voltaje del supercapacitor (V_{SC}), se calculan las corrientes que se demandan a cada fuente, como se observa en las ecuaciones (5.7) y (5.8).

$$I_{FCref} = \frac{P_{Carga}}{V_{FC}} \quad (5.7)$$

$$I_{SCref} = \frac{P_{Carga}}{V_{SC}} \quad (5.8)$$

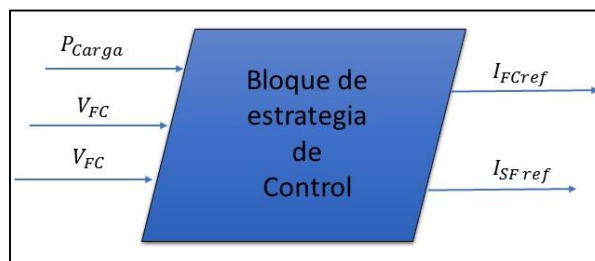


Figura 5.11 Bloque de estrategia de control para administración de la carga.

El lazo de control que corresponde al convertidor conectado al supercapacitor se implementa de acuerdo con lo realizado en la sección (5.1.1), en este lazo se tiene como variable manipulada el ciclo de trabajo del convertidor y como variable controlada la corriente de carga/descarga (I_{SC}). En la figura (5.12) se observa el sistema de celda de combustible-supercapacitor-convertidores, donde las líneas rojas marcan las variables utilizadas para realizar la implementación de los lazos de control por modelo inverso.

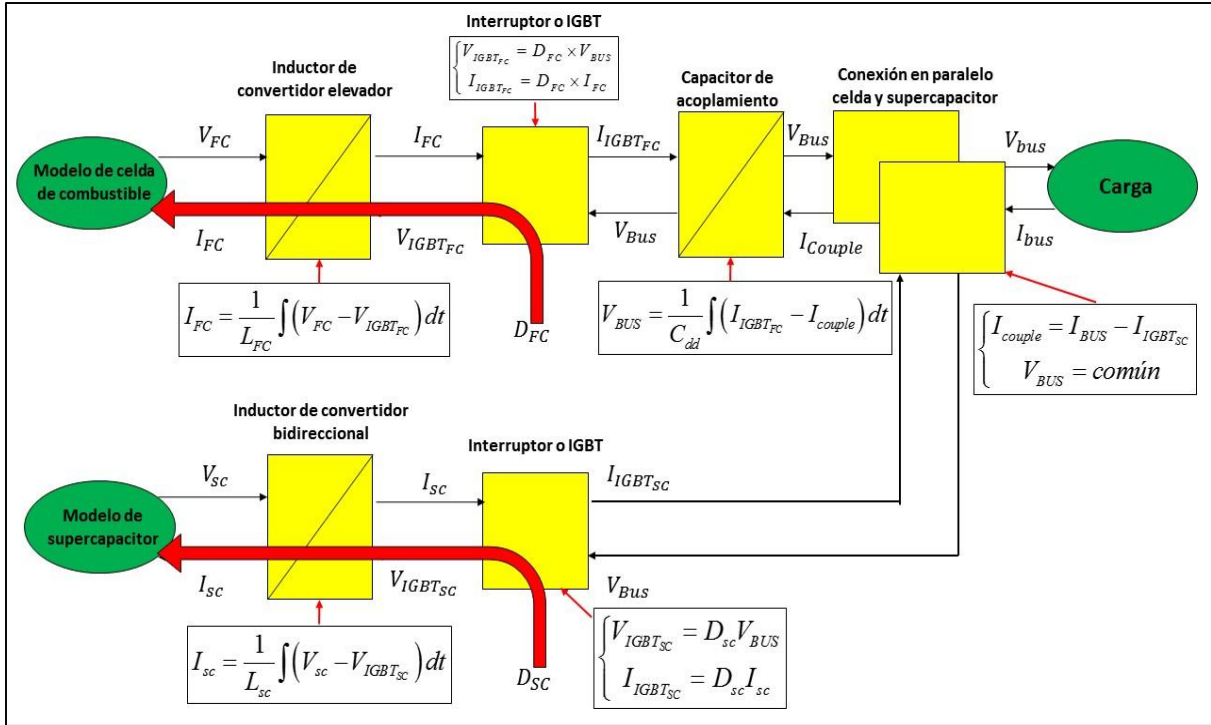


Figura 5.12 Variables a invertir en el sistema híbrido: control local.

La ecuaciones (5.9) y (5.10) modelan el comportamiento de la corriente en el inductor y el voltaje en interruptor del convertidor conectado al supercapacitor.

$$I_{SC} = \frac{1}{L_{SC}} \int (V_{SC} - V_{IGBT_{SC}}) dt \quad (5.9)$$

$$V_{IGBT_{SC}} = D_{SC} \times V_{BUS} \quad (5.10)$$

Las ecuaciones de inversión del interruptor y el inductor del convertidor bidireccional se presentan a continuación.

$$V_{IGBT_{SC}mo} = C [I_{SCref} - I_{SCmed}] + V_{SCmed} \quad (5.11)$$

$$D_{SCmo} = \frac{V_{IGBT_{SCmo}}}{V_{BUS}} \quad (5.12)$$

Como se observa en la ecuación (5.11), se presenta la inversión de una relación dinámica, y por lo tanto se requiere un controlador. Para este caso se implementa un controlador PID, con los parámetros de la tabla (5.2).

Ganancia proporcional (K_p)	-2.5395e ³
Ganancia integral (K_i)	1.9496e ⁵
Ganancia derivativa (K_d)	2.1461e ⁻⁷

En la figura (5.13) se observa el diagrama de bloques del sistema híbrido, donde se aprecia la estrategia de control global y los lazos de control de cada uno de los convertidores de acuerdo con las ecuaciones obtenidas por el método del modelo inverso. La REM del sistema híbrido se aprecia en figura (5.14).

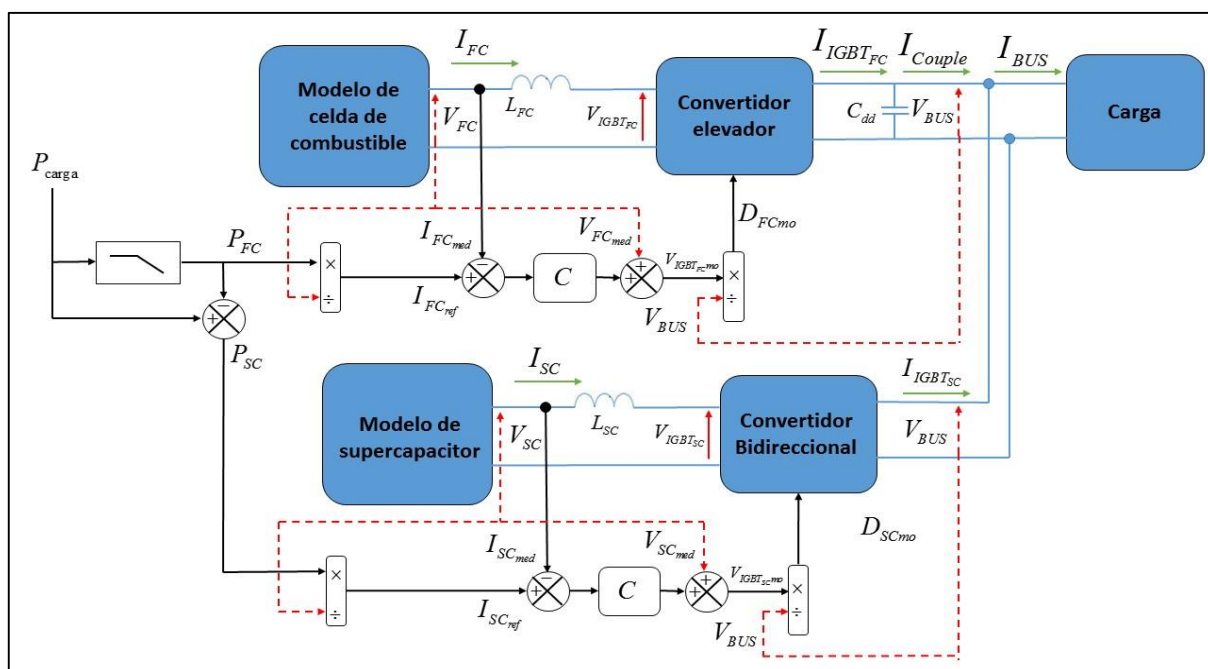


Figura 5.13 Diagrama de bloques de sistema híbrido.

Tal y como se mencionó anteriormente, la estrategia de control por modelo inverso se implementa en la REM través de bloques de color azul y en el interior de estas se encuentran las ecuaciones de inversión. En el anexo (II) se observa la implementación del modelo en Matlab®.

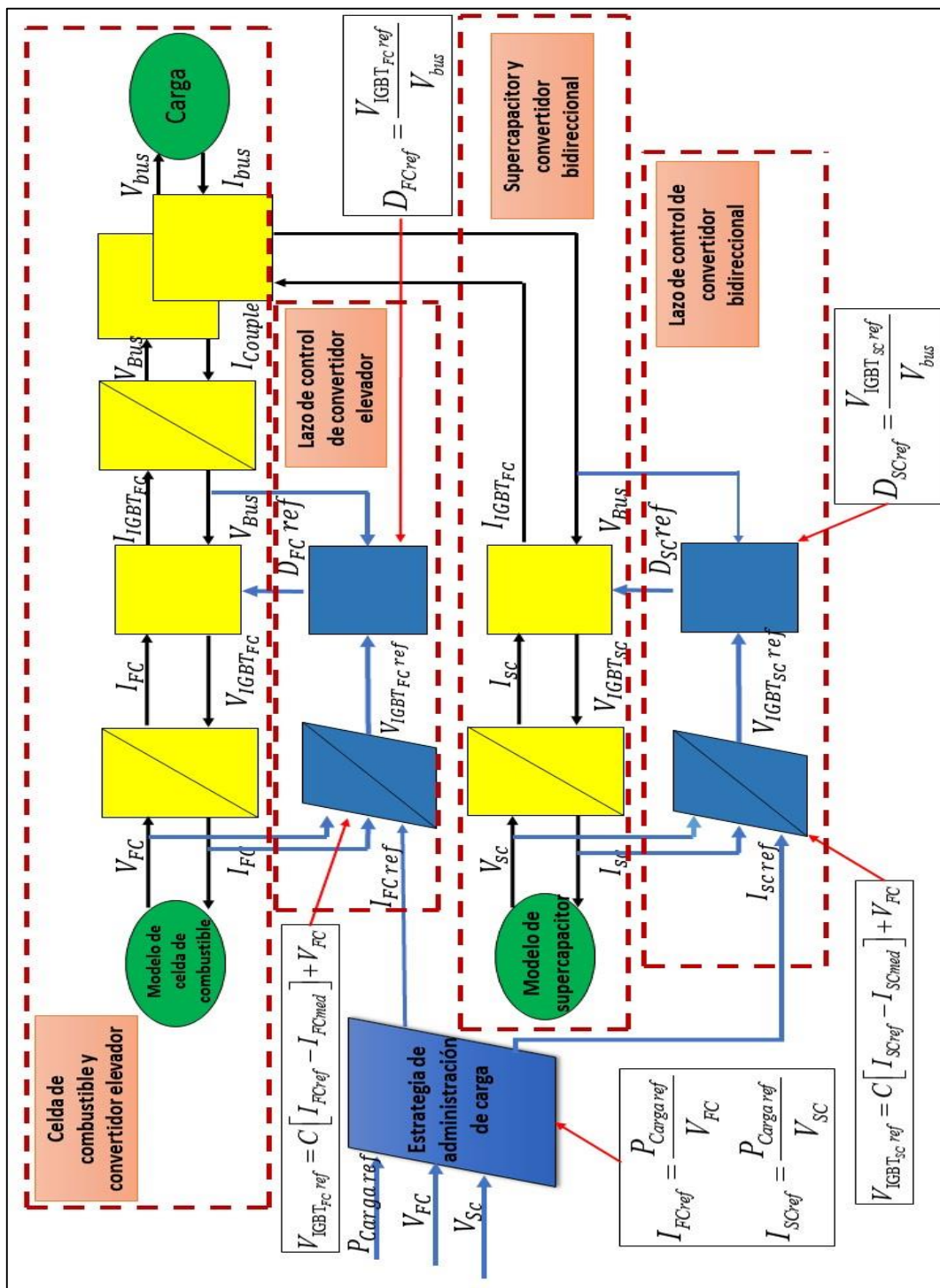


Figura 5.14 REM de sistema híbrido.

5.1.3 Resultados de implementación en simulación

En el Anexo (II) se describe el simulador del sistema híbrido construido con la librería REM de Matlab®. Para analizar la respuesta del sistema híbrido con la estrategia de control integrada, se aplican al sistema tres perfiles de potencia. Posteriormente se presentan los resultados asociados a cada perfil. El primer perfil de potencia es un tren de escalones (figura 5.15). El segundo perfil es el ciclo de conducción NEDC escalado a 1 kW (figura 5.16), y el tercer perfil es una serie de escalones aleatorios (figura 5.17). La celda de combustible opera a una temperatura de 65 °C y con un factor estequiométrico de alimentación de oxígeno de 1.5. En el supercapacitor se considera un estado inicial de carga de 90% que corresponde a 14 Volts.

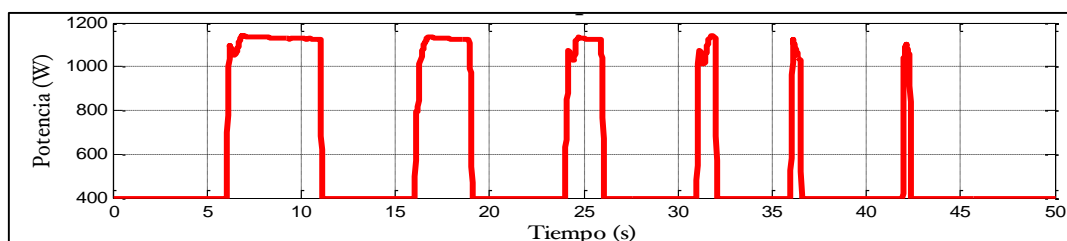


Figura 5.15 Perfil de carga (1): Tren de escalones.

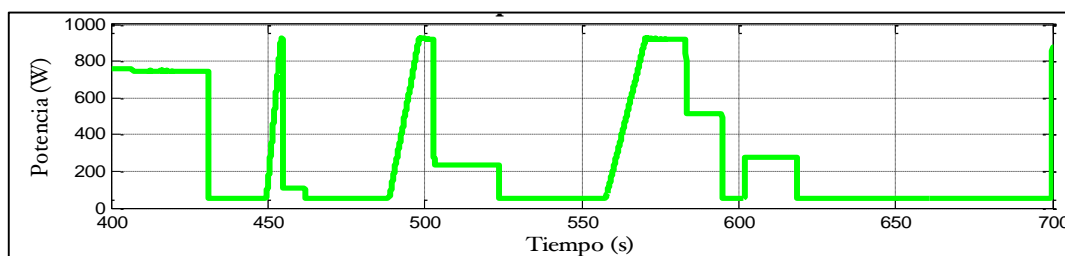


Figura 5.16 Perfil de carga (2): Ciclo NEDC.

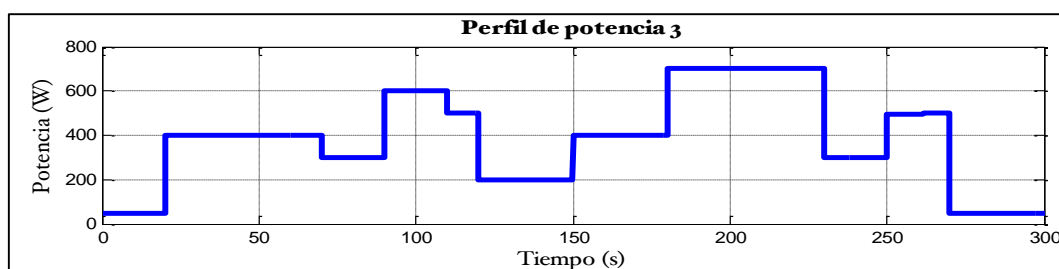


Figura 5.17 Perfil de carga (3): Demanda aleatoria de potencia.

Respuesta del sistema híbrido ante perfil de potencia (1)

En las siguientes graficas se muestra la respuesta del sistema híbrido ante el perfil de potencia (1). En la figura (5.18) se observa la respuesta de la celda de combustible, específicamente, en la gráfica (5.18 A) se compara el voltaje de la celda con la asistencia del supercapacitor y el voltaje de la celda solamente operando con el convertidor elevador (figura 5.3). Como se observa, el voltaje de la celda de combustible (línea verde) sin asistencia del supercapacitor,

presenta el fenómeno de sobretiro negativo. Por el contrario, el voltaje de la celda de combustible con asistencia del supercapacitor (línea azul), el sobretiro desaparece, la dinámica es más suave y disminuyen las pérdidas de voltaje. Esto se explica con el hecho de que después del filtrado, la demanda de corriente a la celda es menor y los cambios abruptos desaparecen (figura (5.18 B)). En consecuencia la potencia que la celda de combustible entrega (figura 5.18 B) disminuye y el faltante de la demanda, es entregado por el supercapacitor.

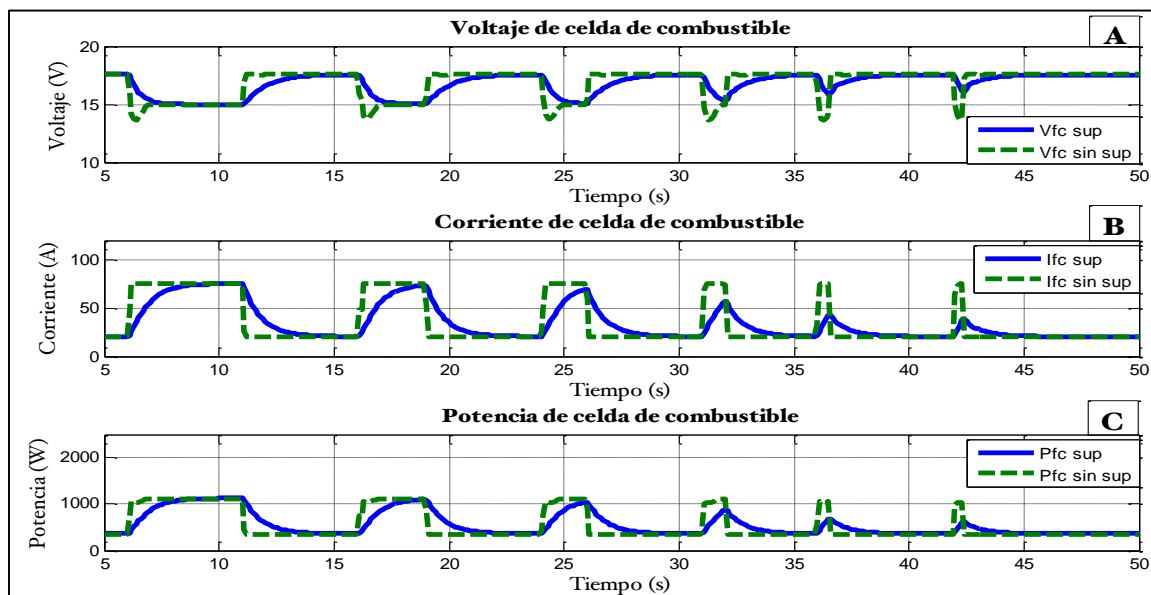


Figura 5.18 Respuesta de la celda de combustible (perfil de potencia 1).

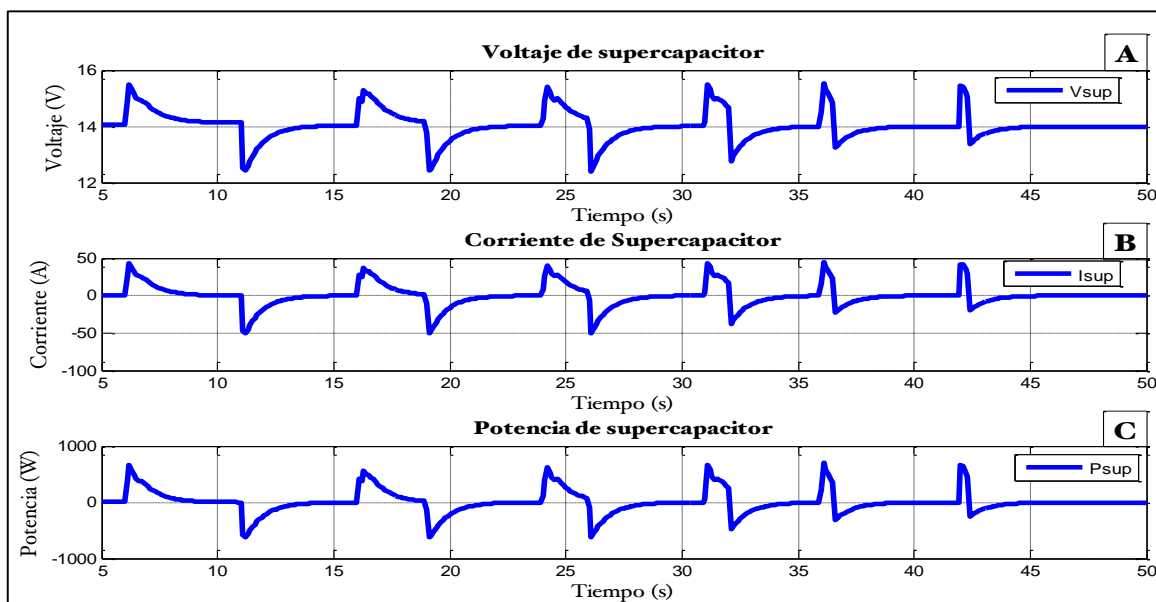


Figura 5.19 Respuesta del supercapacitor (perfil de potencia 1).

En la figura (5.19), se registra el comportamiento del supercapacitor. En la figura (5.19 A) se ven las variaciones de voltaje debidas a las demandas de corriente determinadas por el filtrado de la carga. Estas variaciones se mantienen un rango de 12-16 Volts, debido a que se consideró un voltaje inicial de 14 Volts y que las variaciones de corriente del supercapacitor ocurren con una amplitud y duración que evitan una descarga abajo del valor inicial y una sobrecarga mayor al valor que este puede entregar en la práctica que es de 16 V.

En la figura (5.20) se muestra el desempeño del sistema híbrido. En la gráfica (5.20 A), se observan las perturbaciones del voltaje correspondientes a las variaciones en potencia de la carga (figura 5.20 C). Igualmente se observa que el control logra mantener el valor del voltaje igual al valor de referencia (para un bus de 36 V).

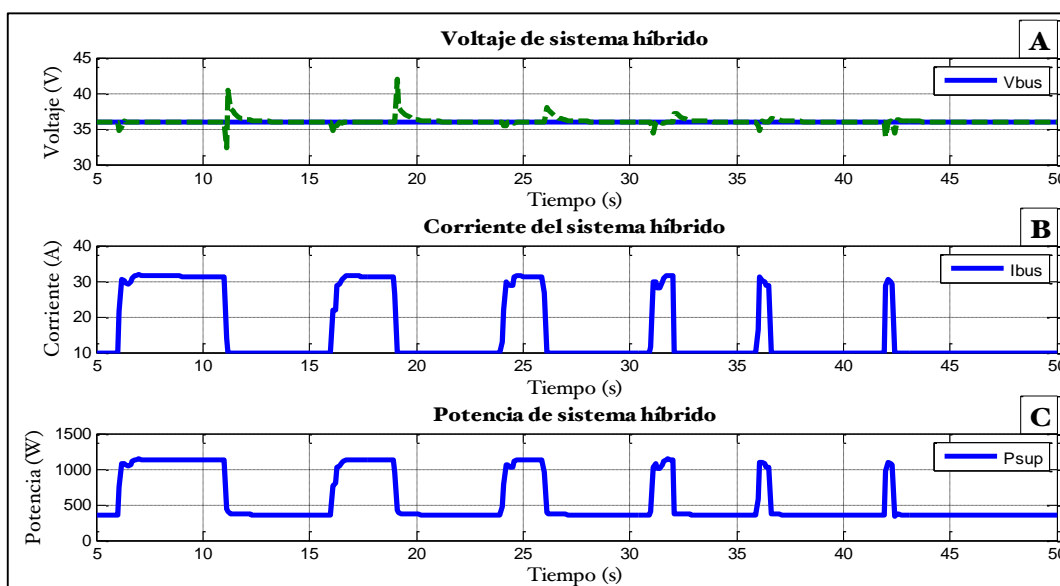


Figura 5.20 Respuesta del sistema híbrido (perfil de potencia 1).

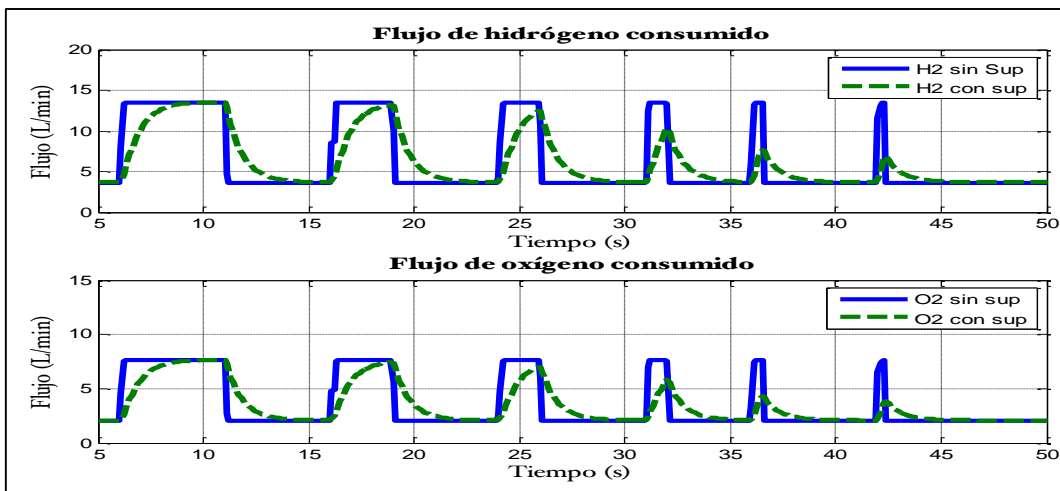


Figura 5.21 Consumo de reactantes (perfil de potencia 1).

Los resultados presentados permiten concluir que se cumplen los objetivos de la estrategia de administración de carga diseñada; es decir, es posible mantener una respuesta de voltaje sin el fenómeno de sobretiro negativo y una demanda de corriente sin cambios abruptos en la celda de combustible. El criterio de disminución en el consumo de reactantes para la celda de combustible se cumple también como se observa en los datos registrados en la figura (5.21), aquí se compara el consumo de hidrógeno y de oxígeno en la celda de combustible con el consumo de oxígeno que resultaría de un sistema sin asistencia de un supercapacitor.

Finalmente, la acción de los lazos de control se ve reflejada en el comportamiento del ciclo de trabajo de los convertidores asociados a la celda de combustible y del supercapacitor (figura 5.22 A y B). En estas pruebas, el ciclo de trabajo se ajusta según la demanda de corriente aplicada a cada convertidor con el objetivo de mantener una respuesta el voltaje en la salida del sistema igual a la referencia.

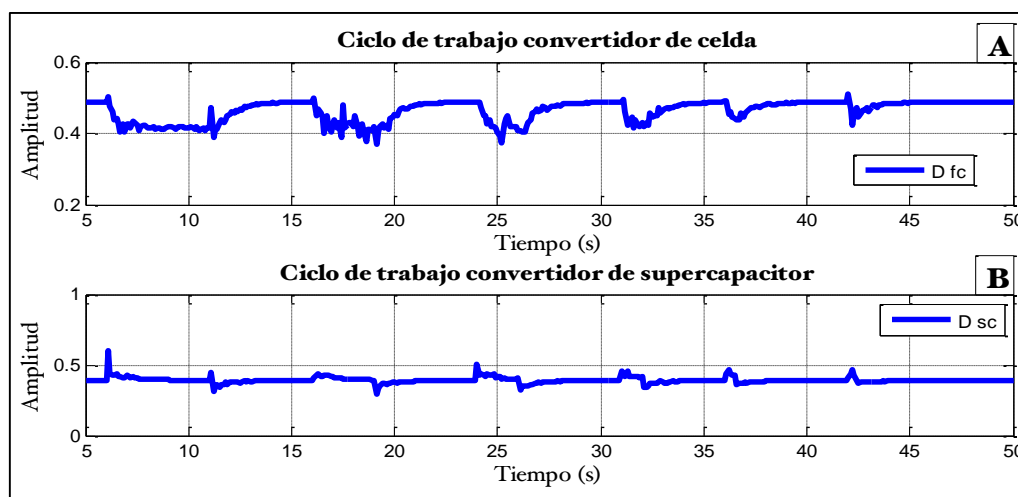


Figura 5.22 Ciclos de trabajo de convertidores (perfil de potencia 1).

Respuesta del sistema híbrido ante perfil de potencia (2): Ciclo NEDC

Aplicando el perfil de carga (2) (ciclo de conducción NEDC escalado a 1 kW) se obtienen los resultados registrados en las siguientes figuras. En la figura (5.23) se compara el voltaje que la celda de combustible entrega como parte del sistema híbrido, con el voltaje que la celda entrega cuando opera sin el supercapacitor y está conectada sólo con el convertidor (figura 5.23). En el primer caso, la corriente de la celda de combustible no presenta cambios abruptos gracias a la distribución hecha a través del filtrado (figura 5.23 B). La potencia correspondiente que entrega la celda de combustible se muestra en la figura (5.23 C).

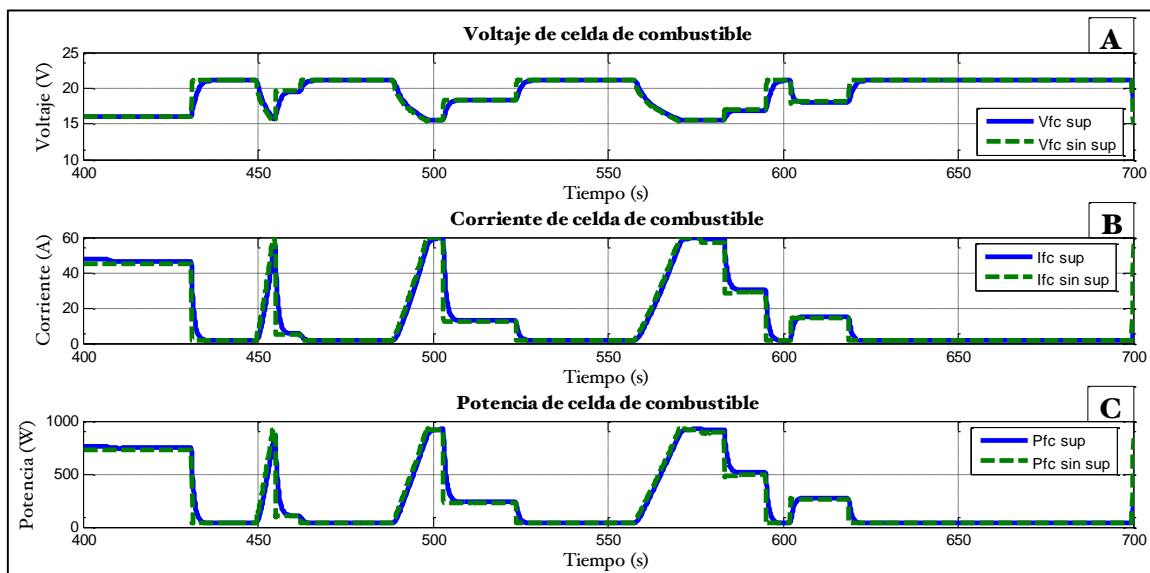


Figura 5.23 Respuesta de celda de combustible (perfil de potencia 2).

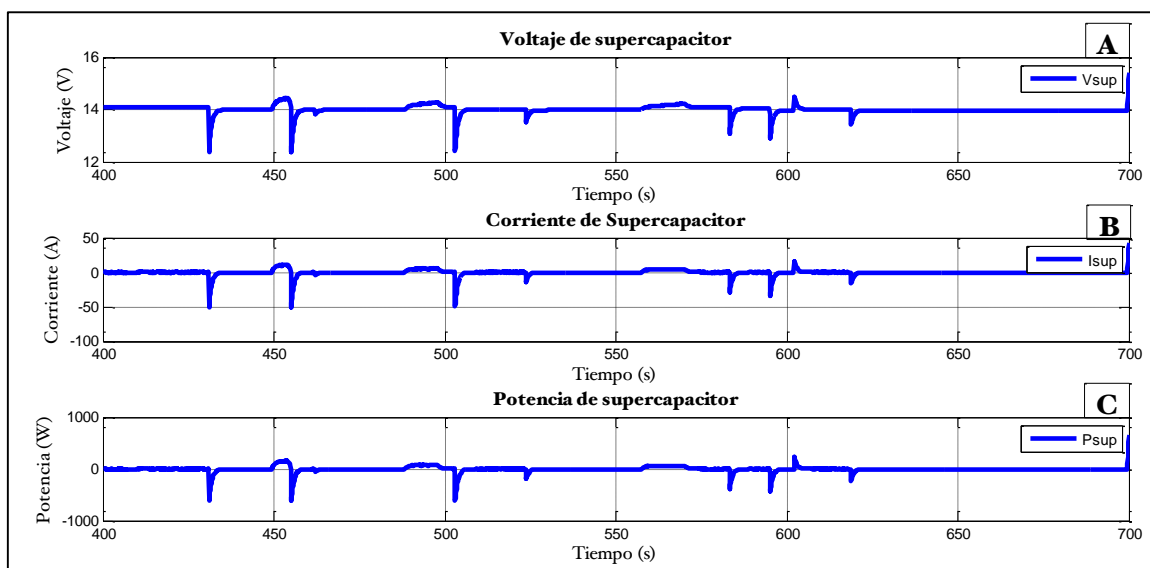


Figura 5.24 Respuesta del supercapacitor (perfil de potencia 2).

Las variaciones de voltaje en el supercapacitor (figura 5.244 A) son menores, puesto que la demanda de potencia se distribuye entre la celda y el supercapacitor y en ambos casos, esta tiene cambios menos abruptos. Lo anterior se observa en la corriente de carga y descarga que es menor en comparación con la prueba anterior (5.24 B).

En la figura (5.25 A) se puede apreciar que el voltaje del sistema híbrido se regula fácilmente y que la mayoría del tiempo se logra mantener igual al valor de referencia ante los cambios de potencia de carga correspondientes al ciclo NEDC.

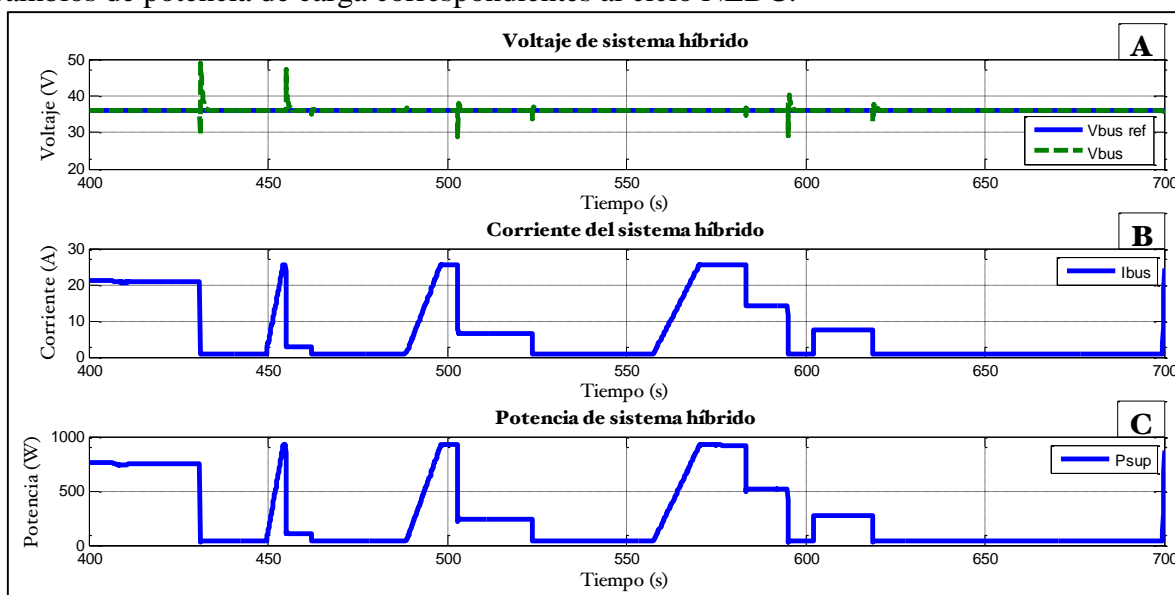


Figura 5.25 Respuesta de sistema híbrido (perfil de potencia 2).

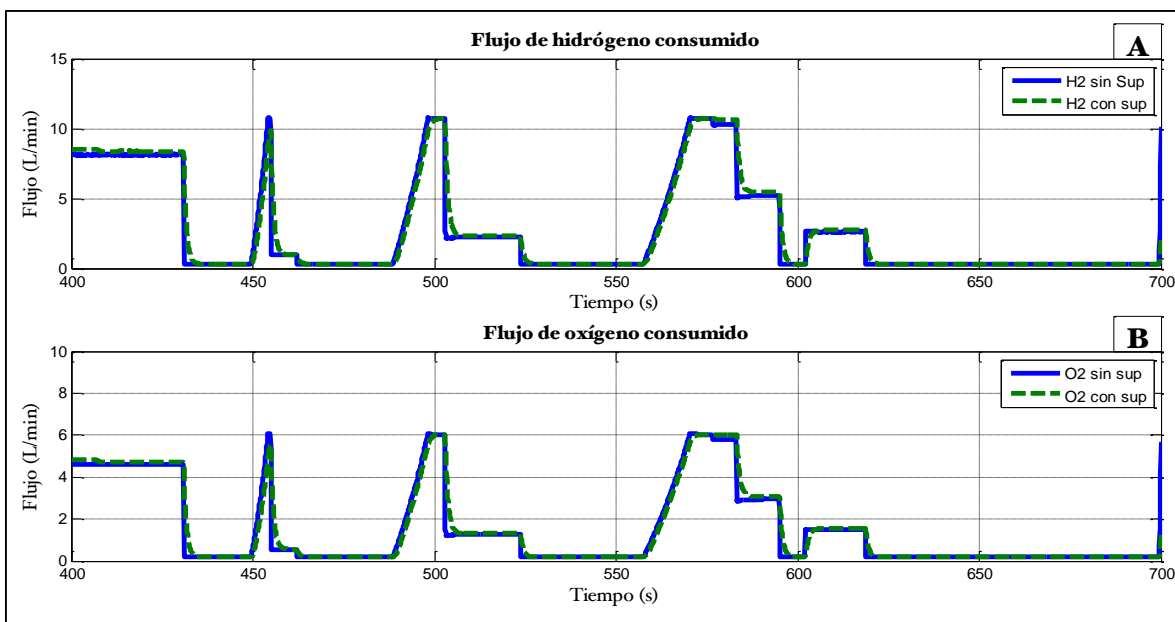


Figura 5.26 Consumo de reactantes (perfil de potencia 2).

El consumo de reactantes se observa en la figura (5.26), el consumo de hidrógeno y oxígeno es menor con la asistencia del supercapacitor.

Finalmente en la figura (5.27), la acción del control global se aprecia en las variaciones del ciclo de trabajo de los convertidores, los cuales se ajustan a partir de la corriente de referencia de cada convertidor con el objetivo de mantener en el sistema híbrido un voltaje de igual al valor de referencia.

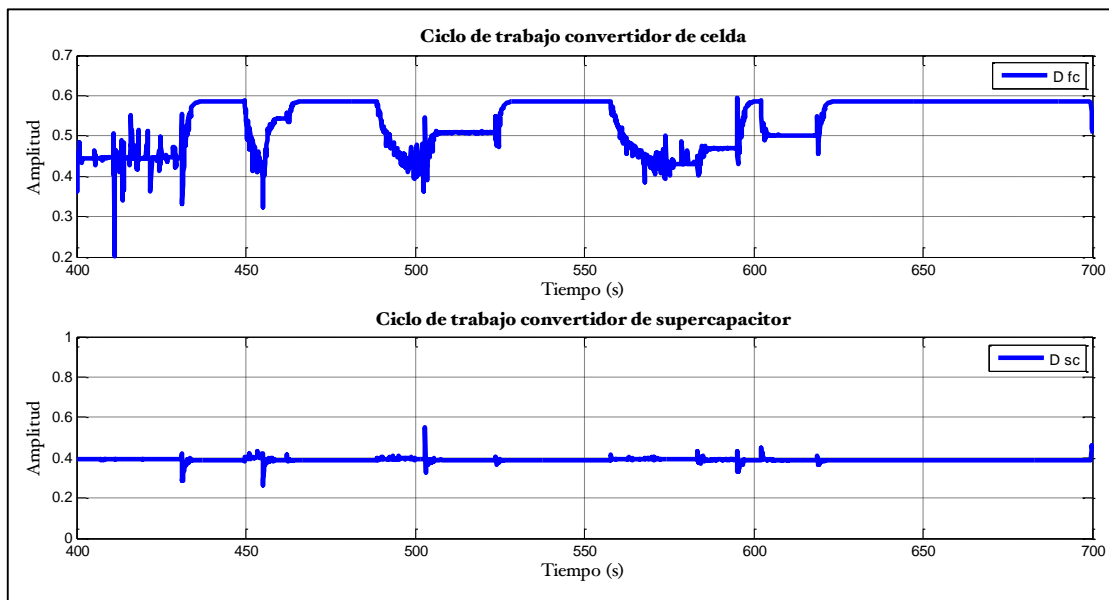


Figura 5.27 Ciclo de trabajo de convertidores (perfil de potencia 2).

Respuesta del sistema híbrido ante perfil de potencia (3)

Se prueba el desempeño del sistema híbrido ante un último perfil de potencia; en esta prueba se registra un comportamiento similar al observado en las pruebas anteriores. En este caso, el perfil de potencia tiene cambios abruptos menores y con una duración mayor que los perfiles anteriores. El voltaje de la celda de combustible en el sistema híbrido se compara con el voltaje de la celda cuando opera sólo con el convertidor (figura 5.28 A). Se observa que desaparecen los sobretiros negativos puesto que la corriente ya no posee cambios abruptos (figura 5.28 B).

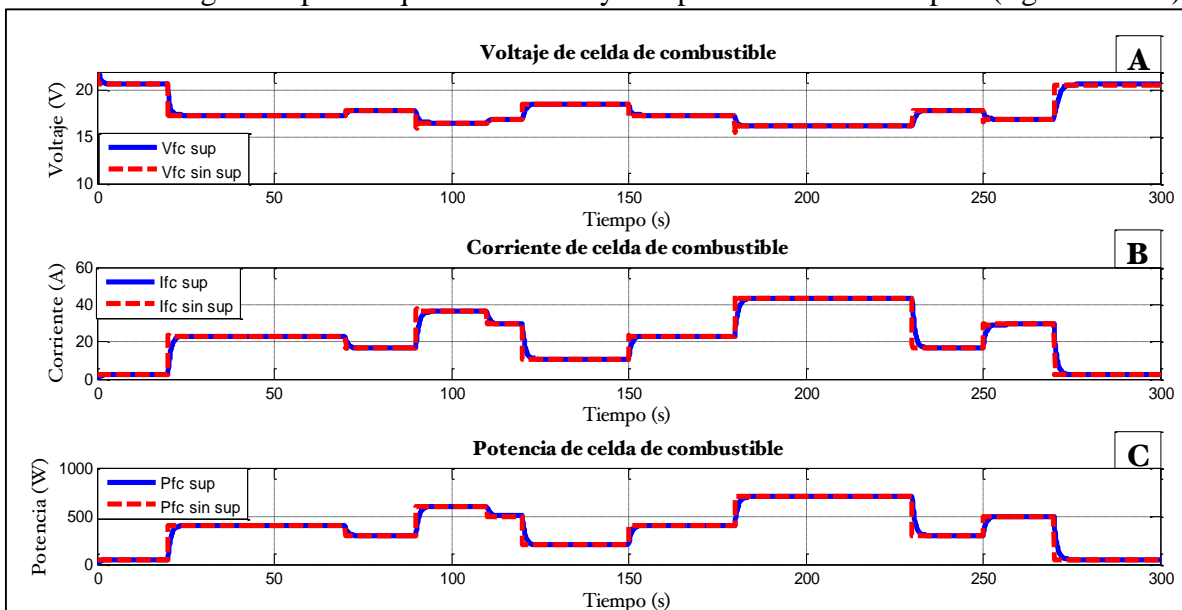


Figura 5.28 Respuesta de celda de combustible (perfil de potencia 3).

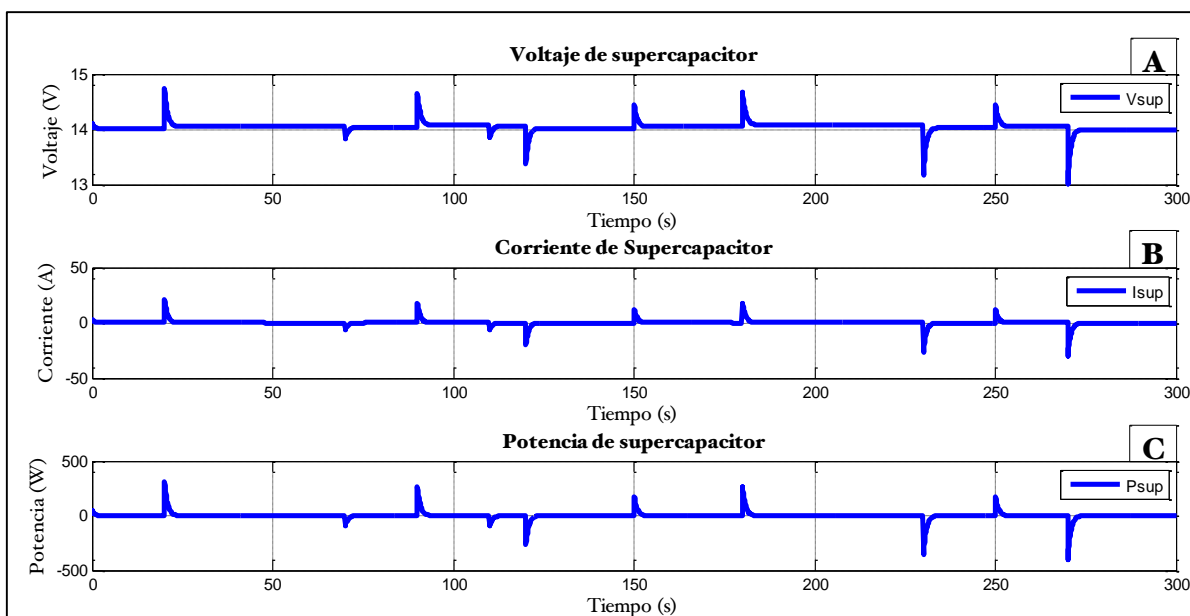


Figura 5.29 Respuesta del supercapacitor (perfil de potencia 3).

La respuesta en voltaje del supercapacitor (figura 5.29 A) presenta variaciones menores. En esta prueba, la utilización del supercapacitor es entonces reducida debido a que la corriente que demanda la carga (figura 5.97 B) tiene variaciones menos abruptas y la celda, como fuente primaria, puede proporcionar la mayor parte de la potencia requerida. El voltaje, al igual que en las pruebas anteriores, permanece en el valor de referencia (figura 5.30 A).

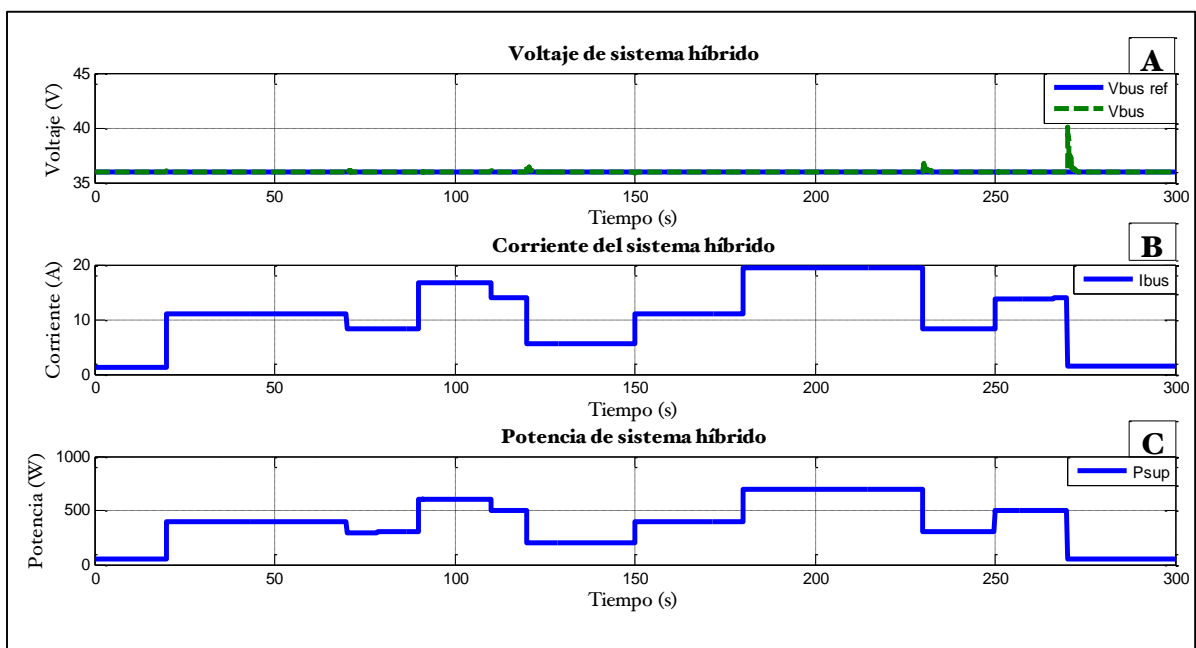


Figura 5.30 Respuesta del sistema híbrido (perfil de potencia 3).

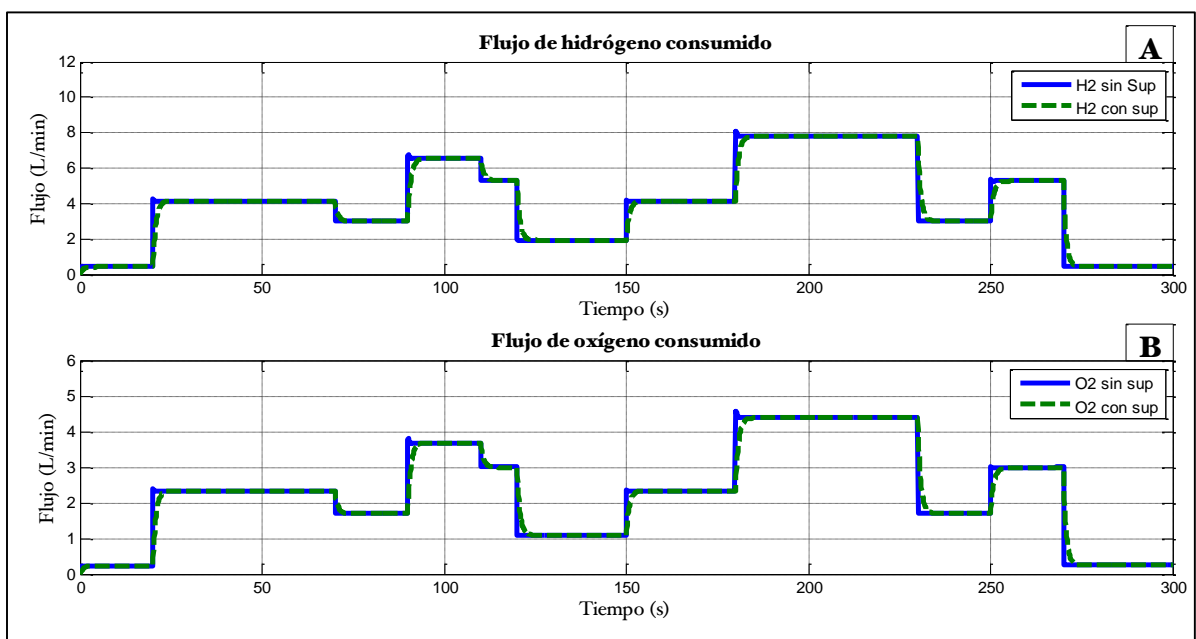


Figura 5.31 Consumo de reactantes (perfil de potencia 3).

Los flujos de los reactantes de igual forma presentan una disminución cuando ocurren los cambios en la corriente que se le demanda a la celda de combustible y se mantienen constantes después de haber ocurrido la transición de un nivel de corriente a otro. Esto se observa en la figura (5.31).

Finalmente, en la figura (5.32) se muestran las variaciones en el ciclo de trabajo de los convertidores que integran al sistema. Esto debido a la acción de control que los controladores locales ejercen en cada convertidor.

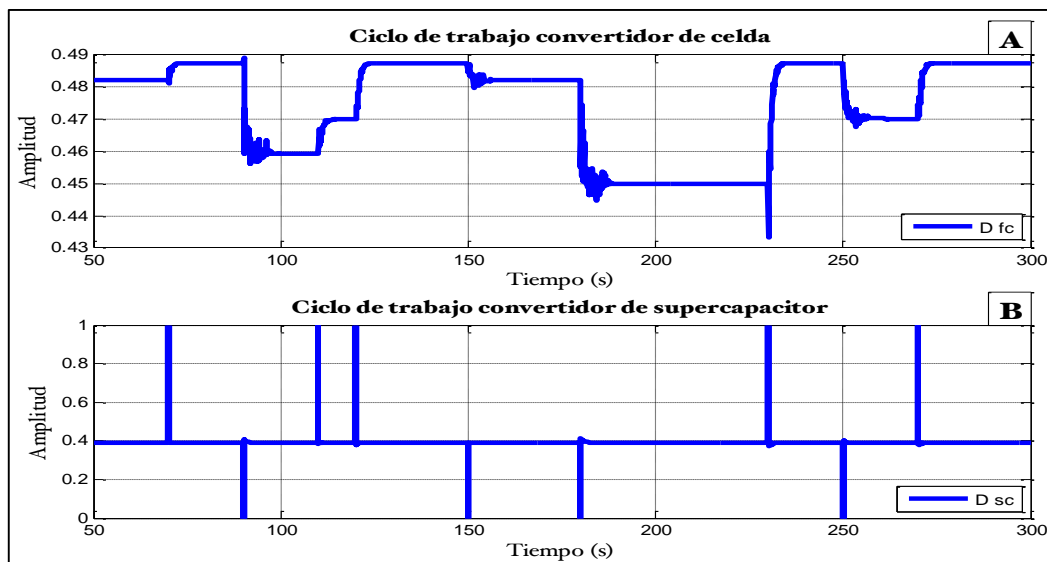


Figura 5.32 Ciclo de trabajo de los convertidores (perfil de potencia 3).

De acuerdo con los resultados descritos anteriormente, se observa que la estrategia de control cumple con los criterios establecidos anteriormente, permitiendo tener una demanda de corriente sin cambios abruptos para la celda de combustible y por consiguiente una respuesta en voltaje sin el fenómeno de sobretiro negativo y en consecuencia la disminución en el consumo de reactantes. Así mismo, la estrategia de control global, permitió administrar la carga demandada al sistema, repartiendo la potencia entre la celda de combustible y el supercapacitor.

Capítulo VI. Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

6.1.1 Modelo matemático de celda de combustible Bahia

De acuerdo con los resultados mostrados en el capítulo II, se concluye que se logró reproducir el comportamiento dinámico de la respuesta eléctrica del sistema Bahia, modificando algunos parámetros del modelo desarrollado por Zamora-Escobedo (2005) [6]. Estos parámetros fueron el área activa, la capacitancia de doble capa y la resistencia interna del apilamiento. También se incorporó la dinámica del suministro de reactantes que caracteriza el efecto de las variaciones de flujo y de presión en el cátodo y el ánodo del apilamiento. De esta forma, se obtuvo un modelo dinámico en función de la temperatura, del flujo y de la corriente, capaz de describir el comportamiento eléctrico de una celda de combustible de un 1kW.

La presentación del modelo del sistema Bahia a través de la REM muestra desde un punto de vista energético como se lleva a cabo el proceso de generación de energía eléctrica en un apilamiento de celdas de combustible, considerando las dinámicas presentes en la respuesta eléctrica. Los modelos en REM y en circuito equivalente que fue implementado con librerías de Simscape, se compararon con datos experimentales del sistema Bahia, y mostraron un buen desempeño durante los fenómenos transitorios así como en el estado estable. Los aspectos anteriores permiten no sólo integrar el modelo en el simulador de un sistema híbrido, sino también conocer un comportamiento aproximado del apilamiento de celdas de combustible *Bahia*, al formar parte de dicho sistema.

6.1.2 Modelo matemático de Supercapacitor

El modelo de supercapacitor utilizado en esta investigación fue ajustado y validado con datos experimentales de un banco de supercapacitores Maxwell de 1 kW, la integración de éste con el modelo de la celda permitió simular un sistema híbrido usando el método de REM. Al comparar el modelo REM con el circuito equivalente y los datos experimentales, se observó un buen desempeño de ambos modelos. Se logró entonces reproducir en gran parte la dinámica de un supercapacitor real para ser incorporada al sistema híbrido.

6.1.3 Modelo matemático de convertidores

Se usó la topología de convertidores propuesta por Boulon *et al.*, (2007) para enlazar dispositivos de dinámicas distintas. El simulador integrado fuentes-convertidores fue implementado utilizando la REM. Las unidades de adecuación de potencia fueron simuladas con modelos en circuitos equivalentes muy simples y además con elementos ideales; sin

embargo, su integración en el sistema permitió simular un sistema híbrido completo basado en celdas de combustible tipo PEM.

De igual forma, el sistema de celda de combustible-supercapacitor-convertidores planteo el reto de establecer una estrategia de control capaz de permitir a la celda de combustible y al supercapacitor satisfacer las necesidades de una carga. Esta estrategia, aunque también es simple, ayudó a analizar el desempeño del sistema, escalado a 1 kW, y probarlo ante variaciones típicas en aplicaciones para alimentación en vehículos.

6.1.4 Estrategia de control por modelo inverso

La estrategia de administración de carga fue asegurada a través de un controlador diseñado con la técnica de modelo inverso. El sistema controlado permitió distribuir la carga demandada entre la celda de combustible y el supercapacitor. Como resultado se tiene un simulador con modelos simples y convertidores ideales, pero el conjunto es capaz de mostrar el comportamiento dinámico de un sistema de alimentación híbrido. Considerando esto como un primer ejercicio en el desarrollo de sistemas con doble fuente se tiene una buena aproximación de lo que se pudiera ocurrir en dispositivos reales.

6.2 Trabajos futuros

- Complementar el simulador de celda de combustible integrando la dinámica del sistema de enfriamiento, modelando a través de balances de energía y validar los resultados con datos experimentales.
- Incorporar lazos de control en la celda de combustible para el suministro de reactantes, humedad relativa del oxígeno y temperatura de operación.
- Modelar e integrar el efecto de la temperatura en el simulador del supercapacitor.
- Considerar no idealidades en los elementos del simulador del sistema híbrido. Incluir el efecto de la conmutación en los convertidores, a través de una simulación por componentes y comparar la respuesta de esta con el modelo del sistema híbrido en la REM.
- Implementar otras estrategias de administración de carga considerando otros tipos de controladores y comparar con el control por modelo inverso aplicado en este tema de investigación con el fin de evaluar su desempeño.
- Realizar pruebas en el sistema experimental Bahia con el fin de obtener datos que permitan ajustar mejor el modelo de celda de combustible siguiendo la metodología del trabajo desarrollado por Zamora y Escobedo , (2005) [6].

Referencias

- [1] C. Spiegel, L. Hagar, J. Mckenzie, L. Hahn, M. Mcgee, and S. Ingle, *Designing and Building Fuel Cells*. .
- [2] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd.,, 2003.
- [3] Y. Brunet, *Energy Storage*, WYLE. 2011, p. 245.
- [4] A. Bouscayrol, “Formalismes de Representation et de Commande Appliques Aux Systemes Electromecaniques Multimachines Multiconvertisseurs,” 2003.
- [5] N. Ramírez Moralez, “La Tecnologia de Celdas de Combustible y su Interfase Electrónica de Potencia para Aplicaciones Domésticas e Industriales,” 2004.
- [6] E. Escobedo Hernández and L. A. Zamora Campos, “Modelo Dinámico de Celdas de Combustible,” 2006.
- [7] S. Cruz Manzo, “Análisis y Modelado de Celdas de Combustible Tipo PEM,” 2007.
- [8] A. Castellanos Silva, “Diseño de Controladores para un Simulador de un Sistema de Alimentación basado en Celdas de Combustible.”
- [9] J. T. Pukrushpan, “Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors,” 2003.
- [10] J. E. Mota Cruz, “Simulación y Control de un Sistema de Alimentación Basado en Celdas de Combustible,” 2010.
- [11] A. G. Wisther Sánchez, “Control de un Sistema de Alimentación Basado en Celdas de Combustible con Modelado del Intercambiador de Calor.”
- [12] E. González Arévalo, “Control de un Sistema de Alimentación basado en Celdas de Combustible con Modelado de Compresor.”
- [13] A. Cruz Rojas, “Diseño de un Esquema de Control en Aspen Plus para Simular el Balance de Planta de un Sistema de Celdas de Combustible,” cenidet, 2013.
- [14] A. Leyva Mancilla, “Simulación de un conjunto de celda de combustible-convertidor CD/CA de 1kW con reducción en la corriente de rizo,” CENIDET, 2014.

- [15] P. J. Barre, a. Bouscayrol, P. Delarue, E. Dumetz, F. Giraud, J. P. Hautier, X. Kestelyn, B. Lemaire-Semail, and E. Semail, "Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions," *IECON 2006 - 32nd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron.*, pp. 5276–5281, Nov. 2006.
- [16] J. Hautier, J. Faucher, and J. Caron, "Le Graphe Informationnel Causal , Un outil pour," pp. 1–18.
- [17] D. Chrenko, M. Péra, D. Hissel, and S. M. Ieee, "Fuel Cell System Modeling and Control with Energetic Macroscopic Representation," vol. 2, no. 1, pp. 169–174, 2007.
- [18] L. Boulon, M. C. Pera, D. H. S. Member, I. A. Bouscayrol, and P. Delarue, "Energetic Macroscopic Representation of a Fuel Cell- Supercapacitor System," pp. 290–297, 2007.
- [19] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, 2000.
- [20] L. Boulon, D. Hissel, S. M. Ieee, A. Bouscayrol, M. Ieee, M. C. Péra, P. Delarue, and A. F. C. System, "Multi Physics Modelling and Representation of Power and Energy Sources for Hybrid Electric Vehicles," pp. 8–13, 2008.
- [21] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, A. Hernandez, A. Bouscayrol, P. Sicard, and M. Péra, "Energy Management of a Fuel Cell System : Influence of the Air Supply Control on the Water Issues," pp. 161–166, 2010.
- [22] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, P. Sicard, a. Bouscayrol, and M.-C. Péra, "A macroscopic PEM fuel cell model including water phenomena for vehicle simulation," *Renew. Energy*, vol. 46, pp. 81–91, Oct. 2012.
- [23] L. Boulon, D. Hissel, S. Member, A. Bouscayrol, and M. Péra, "From Modeling to Control of a PEM Fuel Cell Using Energetic Macroscopic Representation," vol. 57, no. 6, pp. 1882–1891, 2010.
- [24] A. Bouscayrol, A. Bruyère, P. Delarue, F. Giraud, Y. Le Menach, W. Lhomme, and F. Locment, "Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - initiation level Keywords."
- [25] A. Bouscayrol, P. Delarue, F. Giraud, X. Guillaud, X. Kestelyn, B. Lemaire-semail, and W. Lhomme, "Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - expert level Keywords EMR fundamentals."

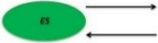
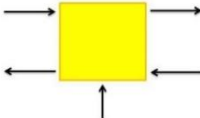
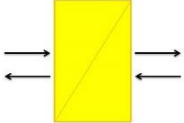
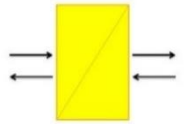
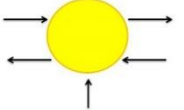
- [26] L. Boulon, D. Hissel, a. Bouscayrol, M. Péra, and P. Delarue, “Maximal and Practical Control Structure of a PEM Fuel Cell System Based on Energetic Macroscopic Representation,” *Fundam. Dev. Fuel Cells Conf. 2008-FDFC2008*, 2008.
- [27] U. P. Xi, “Contribution à l’ Etude d’ Electro-générateurs à Pile à Combustible Conceptions d’ Architectures et de Leurs Commandes.”
- [28] W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, A. Rufer, and S. Member, “Design and Control of a Supercapacitor Storage System for Traction Applications,” pp. 2013–2020, 2013.
- [29] L. Gauchia, a. Bouscayrol, J. Sanz, R. Trigui, and P. Barrade, “Fuel cell, battery and supercapacitor hybrid system for electric vehicle: Modeling and control via energetic macroscopic representation,” *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2011.
- [30] M. Al Sakka, H. Gualous, and J. Van Mierlo, “Characterization of supercapacitors matrix,” *Electrochim. Acta*, vol. 55, no. 25, pp. 7532–7537, Oct. 2010.
- [31] A. Burke, “Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology,” *J. Power Sources*, vol. 91, pp. 37–50, 2000.
- [32] L. Yu and X. Qi, “Bond-graph modeling in system engineering,” *2012 Int. Conf. Syst. Informatics*, no. Icsai, pp. 376–379, May 2012.
- [33] V. Sharma, S. Member, and S. Purwar, “Adaptive Speed Control of a Light Weighted All Electric Vehicle with Unknown Time Delay,” pp. 0–5, 2014.
- [34] H. H. POWER, *Manuel d’Utilisation et d’Installation Banc Didactique Bahia*. p. 64.
- [35] T. Hordé, P. Achard, and R. Metkemeijer, “PEMFC application for aviation: Experimental and numerical study of sensitivity to altitude,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 14, pp. 10818–10829, Jul. 2012.
- [36] Q. Yan, H. Toghiani, and H. Causey, “Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes,” *J. Power Sources*, vol. 161, no. 1, pp. 492–502, Oct. 2006.
- [37] J. T. . Pukrushpan, A. G. . Stefanopoulou, and H. . Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems*, Springer. 2008.
- [38] F. Ciancetta, S. Member, E. Fiorucci, A. Ometto, and N. Rotondale, “The Modeling of a PEM Fuel Cell – Supercapacitor – Battery System in Dynamic Conditions,” pp. 1–5, 2009.

- [39] W. Gao and S. Member, “Performance Comparison of a Fuel Cell-Battery Hybrid Powertrain and a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid Powertrain,” no. May, pp. 846–855, 2005.
- [40] B. A. F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric , Hybrid , and Fuel Cell Vehicles,” no. April, 2007.
- [41] H. Yu, R. Lu, T. Wang, and C. Zhu, “Energetic Macroscopic Representation based modeling and control for battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system in HEV,” *2009 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1390–1394, Sep. 2009.
- [42] T. Azib, G. Remy, O. Bethoux, and C. Marchand, “Control strategy with saturation management of a fuel cell/ultracapacitors hybrid vehicule,” *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2010.
- [43] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, and C. Marchand, “Saturation Management of a Controlled Fuel-Cell / Ultracapacitor Hybrid Vehicle,” no. November, pp. 4127–4138, 2011.
- [44] D. W. Hart, *Electrónica de Potencia*. 2001, p. 447.
- [45] M. Hashem Nehrir and C. Wang, *Modeling and Control of Fuel Cells Distributed Generation Applications*. 2009, p. 291.
- [46] I. San Martín, A. Ursúa, and P. Sanchis, “Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis, modelling and experimental validation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 27, pp. 11655–11671, Sep. 2013.
- [47] F. Ciancetta, G. Bucci, a. Ometto, and N. Rotondale, “System PEM fuel cell-supercapacitor: Analysis in transitory conditions,” *2009 Int. Conf. Clean Electr. Power*, pp. 154–158, Jun. 2009.

Anexos

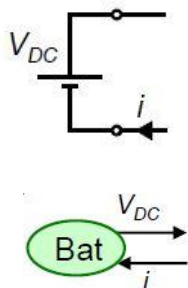
Anexo I. Modelado de elementos usando la Representación Energética Macroscópica

Tabla A.7.1 Relación de los elementos que constituyen a los sistemas y su representación en REM

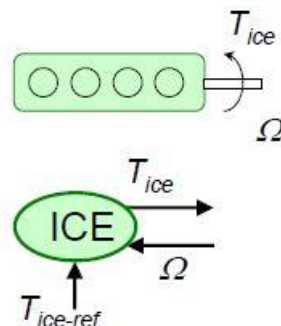
Efecto energético	Elementos de sistema eléctrico	Elementos de sistema mecánico		Elementos de sistema térmico	Elementos de sistema hidráulico	Representación en REM
		Traslacional	Rotacional			
Fuente	Fuente de Voltaje-Corriente	Fuente de fuerza (energía potencial) Fuente de velocidad (energía cinética)	Fuente de torque (energía potencial) Fuente de velocidad angular (energía cinética rotacional)	Fuentes de calor	Fuente de presión Fuente de caudal	
Disipador	Resistencia	Amortiguador traslacional	Amortiguador rotacional	Resistencia térmica	Resistencia hidráulica	
Almacenador	Capacitor	Resorte traslacional	Resorte rotacional	Capacitancia térmica	Capacitancia hidráulica (tanque de almacenamiento)	
	Inductor	Inductancia traslacional	Inductancia rotacional		Inductancia hidráulica	
Transformación	Transformador eléctrico		Palanca mecánica con pivote		Reducción de área	
			Engranajes			

Modelo de elementos tipo fuente

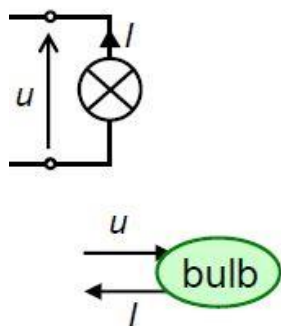
Batería



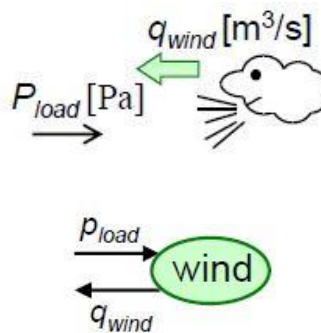
Motor de combustión interna



Bulbo de luz

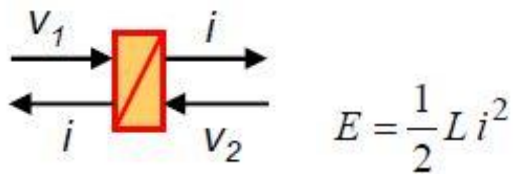
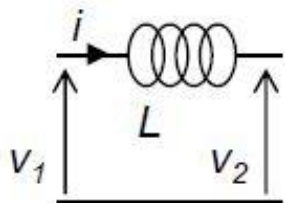


Viento

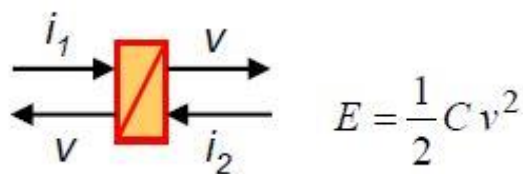
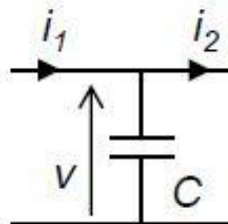


Elementos de acumulación

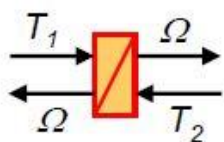
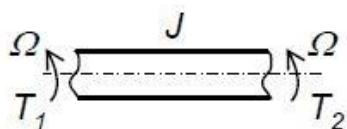
Inductor



Capacitor

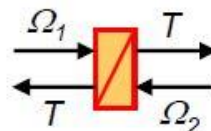


Inercia



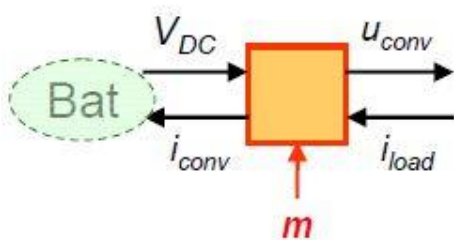
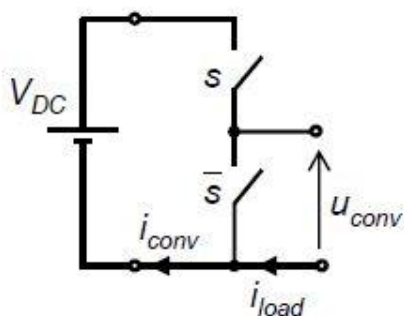
$$E = \frac{1}{2} J \Omega^2$$

Resorte

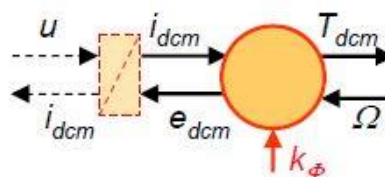
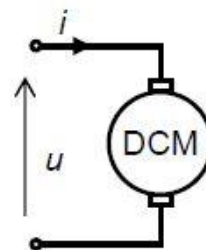


$$E = \frac{1}{2} \frac{1}{k} T^2$$

Elementos de conversión de energía

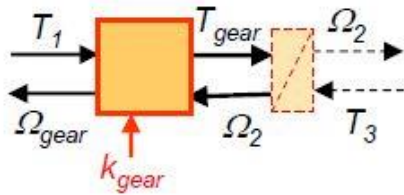
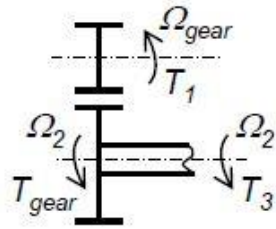


$$\begin{cases} u_{conv} = m V_{DC} \\ i_{conv} = m i_{load} \end{cases}$$



$$L \frac{d}{dt} i_{dcm} + r i_{dcm} = u - e_{dcm}$$

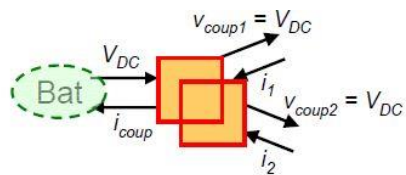
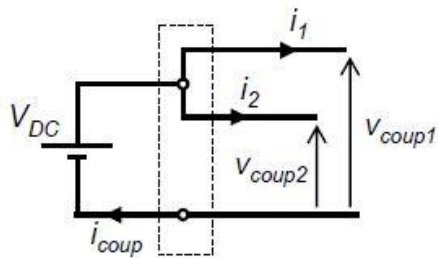
$$\begin{cases} T_{dcm} = k_{\phi} i_{dcm} \\ e_{dcm} = k_{\phi} \Omega \end{cases}$$



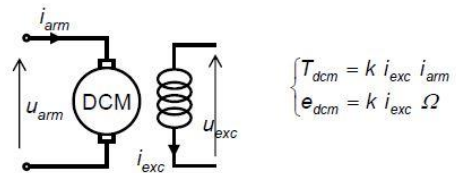
$$\begin{cases} T_{gear} = k_{gear} T_1 \\ \Omega_{gear} = k_{gear} \Omega_2 \end{cases}$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega_2 = T_{gear} - T_3$$

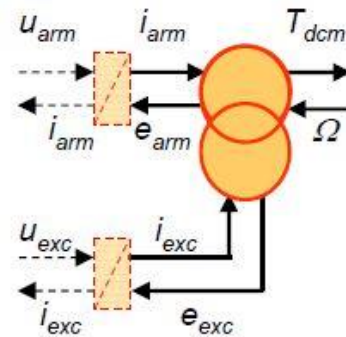
Elementos de acoplamiento

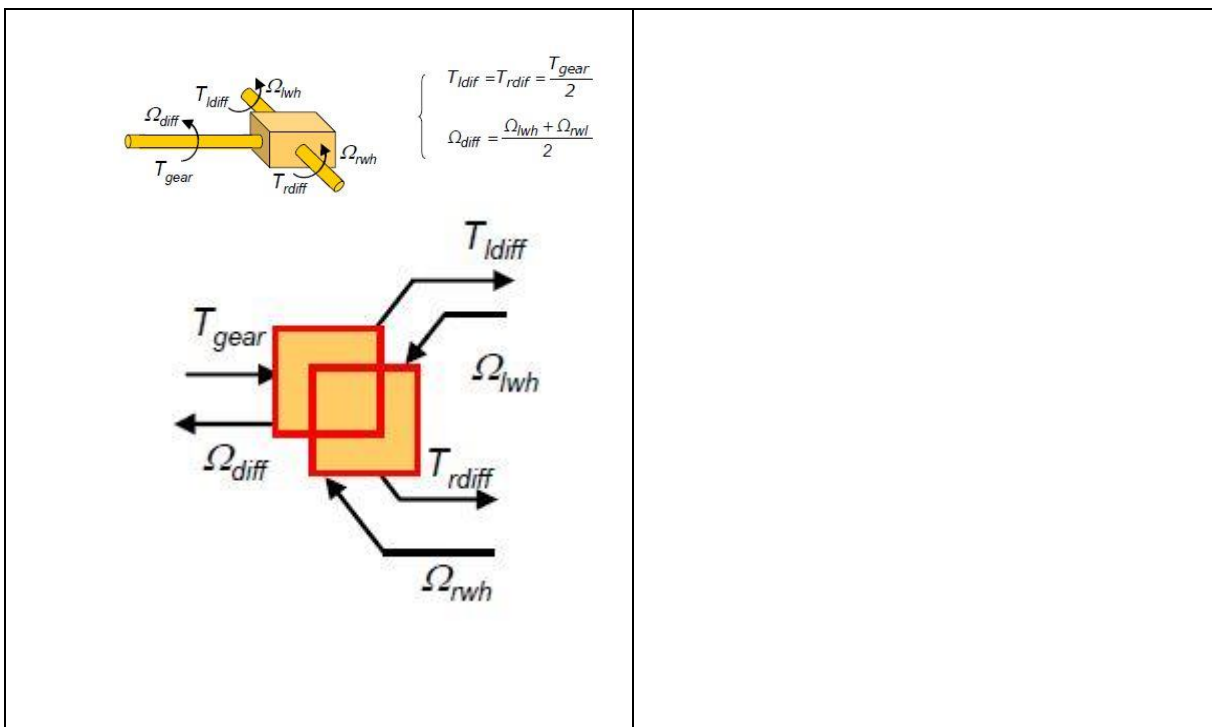


$$\begin{cases} V_{DC} \text{ common} \\ i_{coup} = i_1 + i_2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} T_{dcm} = k i_{exc} i_{arm} \\ e_{dcm} = k i_{exc} \Omega \end{cases}$$





Anexo II. Implementación de modelos en Matlab®

La implementación en un ambiente de simulación de los modelos presentados anteriormente se realizó en *Simulink* de *Matlab®* versión 2013a. En el caso de los modelos por circuito equivalente, se utilizó la librería *Simscape*, donde a partir de elementos tales como capacitores, resistencias, fuentes de voltaje, entre otros se implementó el modelo de la celda de combustible (figura 7.1) y el modelo del supercapacitor (figura 7.2).

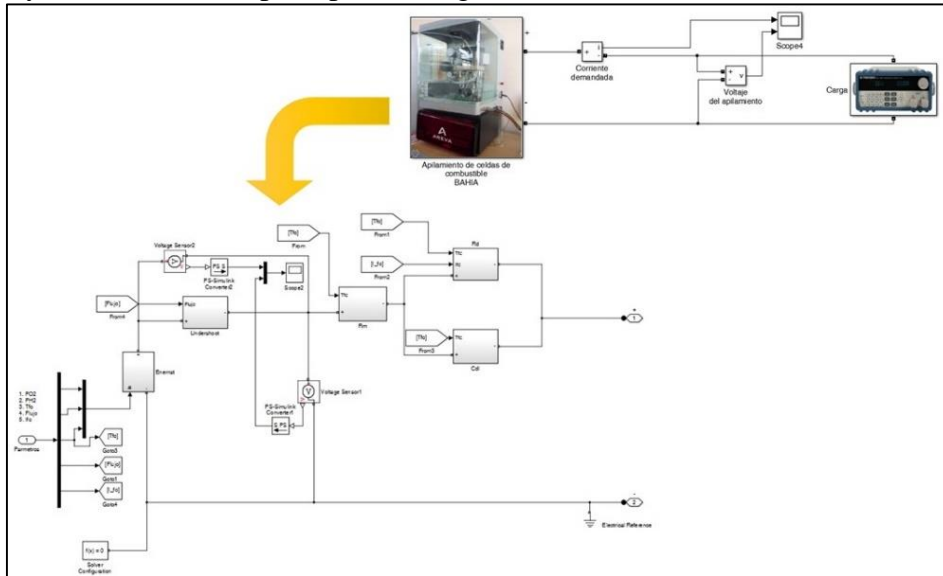


Figura A.7.1 Implementación de circuito equivalente por componentes de celda de combustible en Matlab®.

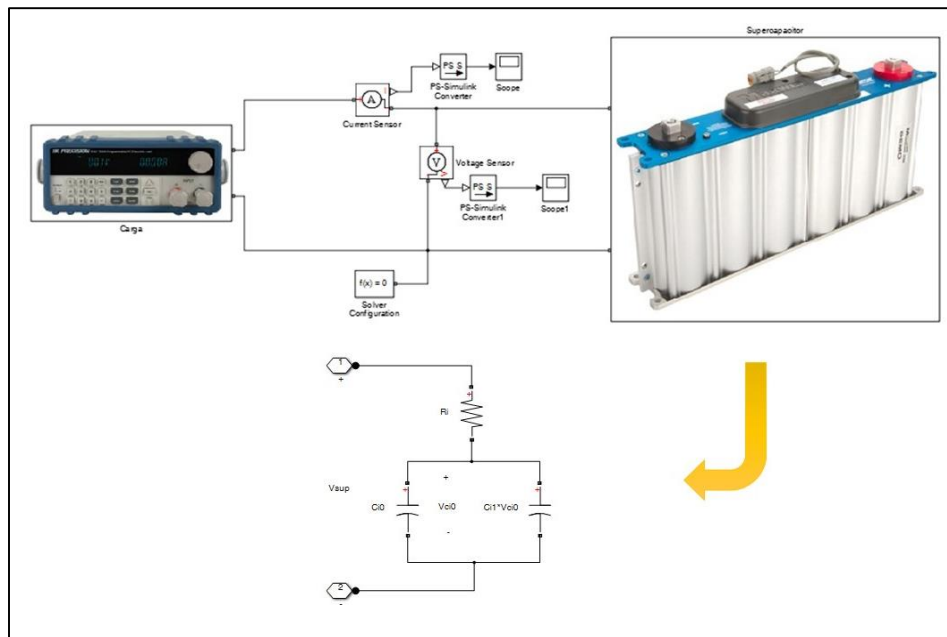


Figura A.7.2 Implementación de circuito equivalente por componentes de supercapacitor en Matlab®.

En el caso del modelo REM de la celda de combustible y del supercapacitor, se utilizó la librería REM versión 2013, la cual fue descargada de la página de internet *EMRWebsite* de la universidad de *Lille* a través del siguiente enlace: <http://www.emrwebsite.org/library.html>. Esta librería como se muestra en la figura (7.3) muestra los bloques correspondientes a los elementos que integran a la REM como “mascaras”, permitiendo definir en su interior las operaciones necesarias respetando las salidas de acuerdo con la causalidad integral que define esta representación. La figura (7.4) y 7.5) muestra la implementación del modelo REM de la celda de combustible y del supercapacitor respectivamente.

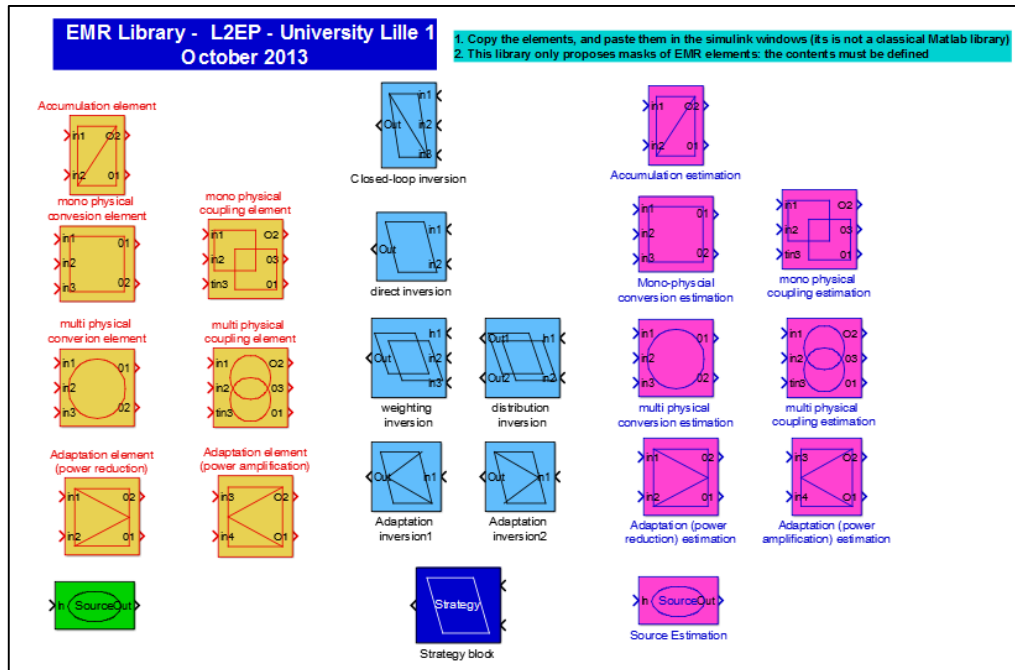


Figura A.7.3 Librería REM.

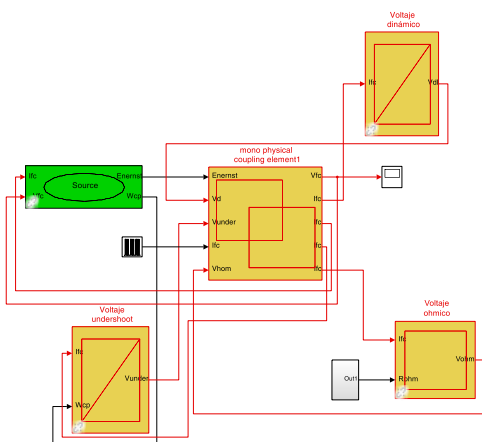


Figura A.7.4 Implementación de modelo REM.

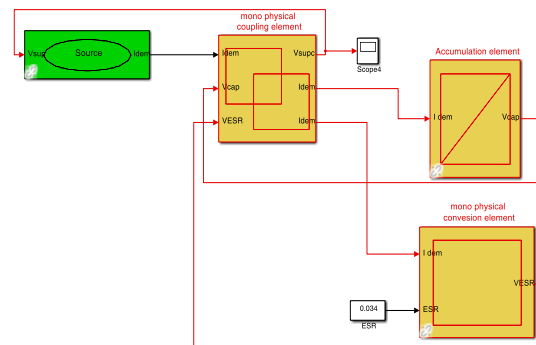


Figura A.7.5 Implementación de modelo REM.

La implementación de la celda de combustible con el convertidor y la estrategia de control por medio de la librería REM se observa en la figura (7.6) y la estrategia de administración de energía con el sistema híbrido en la figura (7.7).

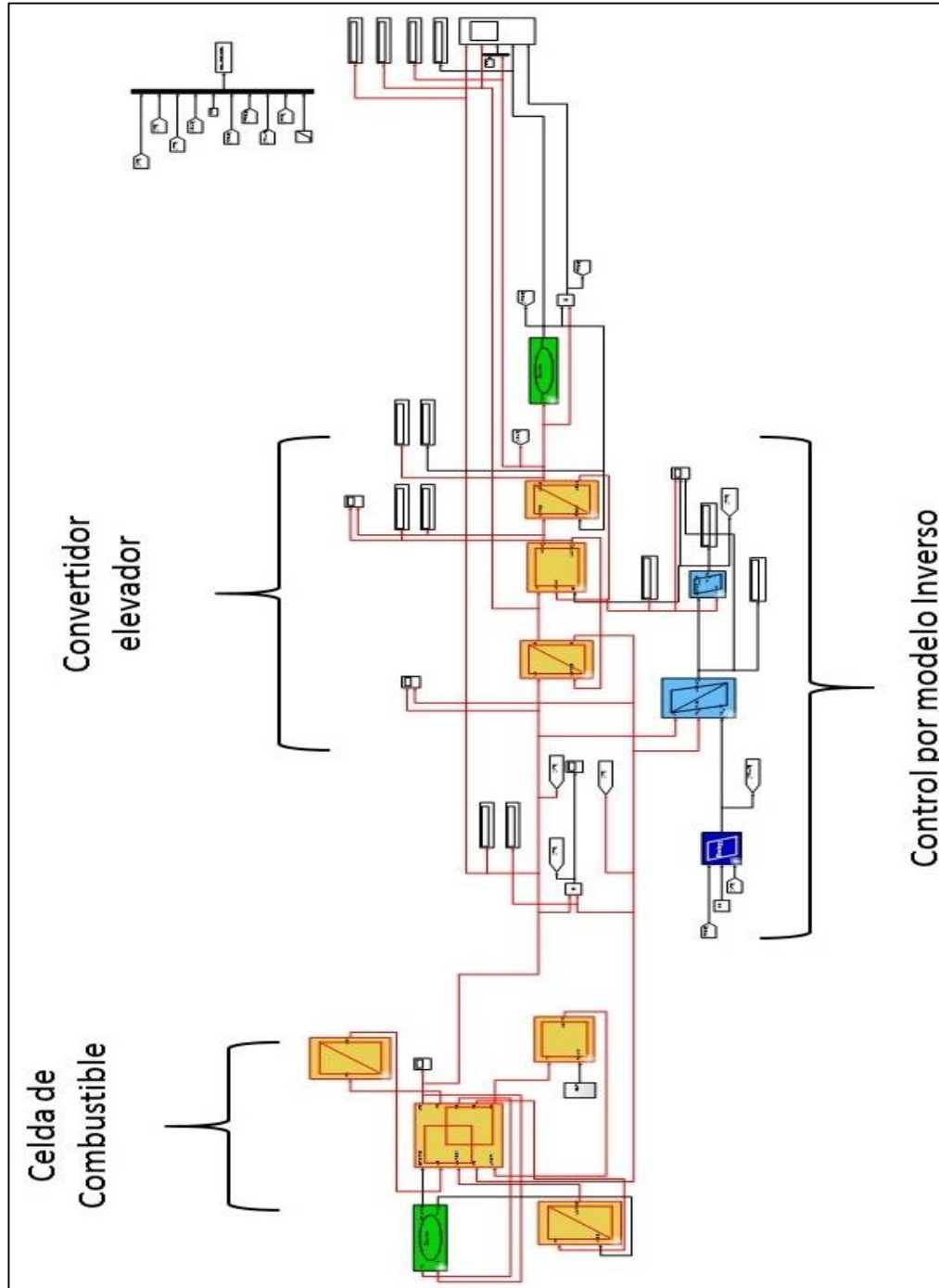


Figura A.7.6 Implementación de celda de combustible-convertidor y control.

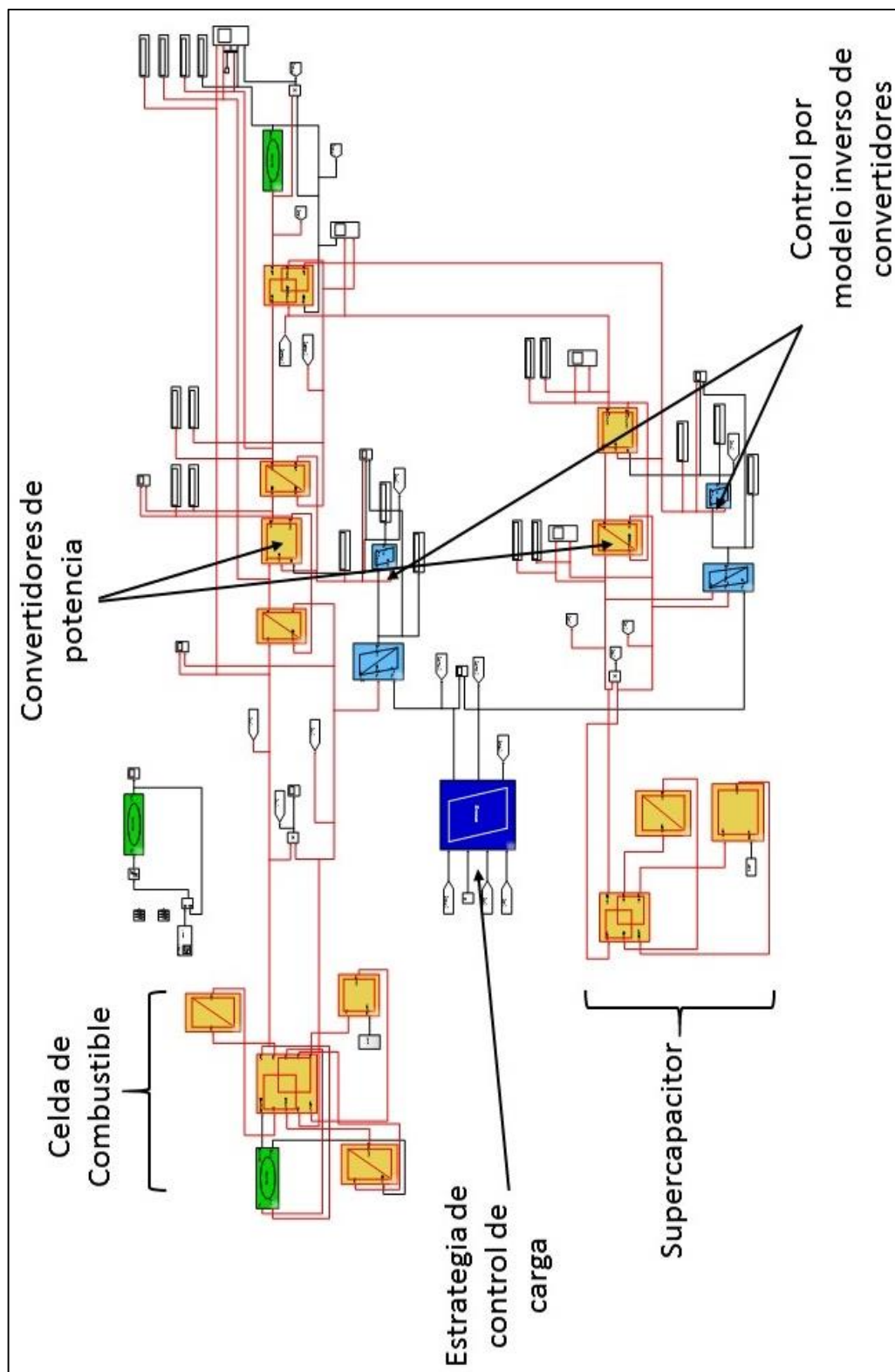


Figura A.7.7 Implementación de celda de combustible-convertidor y control.

Anexo III. Parámetros de supercapacitor

En las siguientes tablas se enlista algunos parámetros del supercapacitor utilizado en esta investigación. La hoja de datos se puede obtener de la página oficial de *Maxwell Technologies* en el siguiente enlace: http://www.maxwell.com/images/documents/datasheet_16v_module.pdf

<i>Capacitancia nominal</i>	500 F
<i>Capacitancia mínima inicial</i>	500 F
<i>Capacitancia máxima inicial</i>	600 F
<i>Resistencia interna serie (ISR)</i>	2.1 mΩ
<i>Voltaje nominal</i>	16 V
<i>Voltaje máximo</i>	17 V
<i>Máxima corriente absoluta</i>	1900 A
<i>Numero de supercapacitores en el banco</i>	6
<i>Capacitancia en cada supercapacitor</i>	3000 F

<i>Temperatura mínima de operación</i>	-40 °C
<i>Temperatura máxima de operación</i>	65° C
<i>Enfriamiento</i>	Convección natural

<i>Potencia específica útil</i>	2700 W/kg
<i>Potencia específica</i>	5500 W/kg
<i>Energía específica</i>	3.2 Wh/kg
<i>Energía almacenada</i>	18 Wh

Anexo IV: Dinámica fluidica de la celda de combustible

En este anexo se muestra la respuesta del modelo del suministro de reactantes como resultado parcial de la validación del modelo REM y CE de la celda de combustible descritas en el capítulo III, sección (3.3.1). Como las ecuaciones del suministro de reactantes en el modelo REM y en el modelo CE son las mismas los resultados aquí presentados representa el comportamiento del suministro del oxígeno y del hidrógeno para ambos modelos.

La figura (7.8), (7.9) y (7.10), corresponde a la prueba de escalones de corriente, rampas y al ciclo de conducción NEDC. En estas graficas se observa la presión en el ánodo y cátodo del apilamiento, así como también la cantidad de flujo de hidrógeno y oxígeno consumidos por el apilamiento de celdas. Así mismo se observa que la estequiometria del oxígeno establecido se mantiene en el valor de referencia.

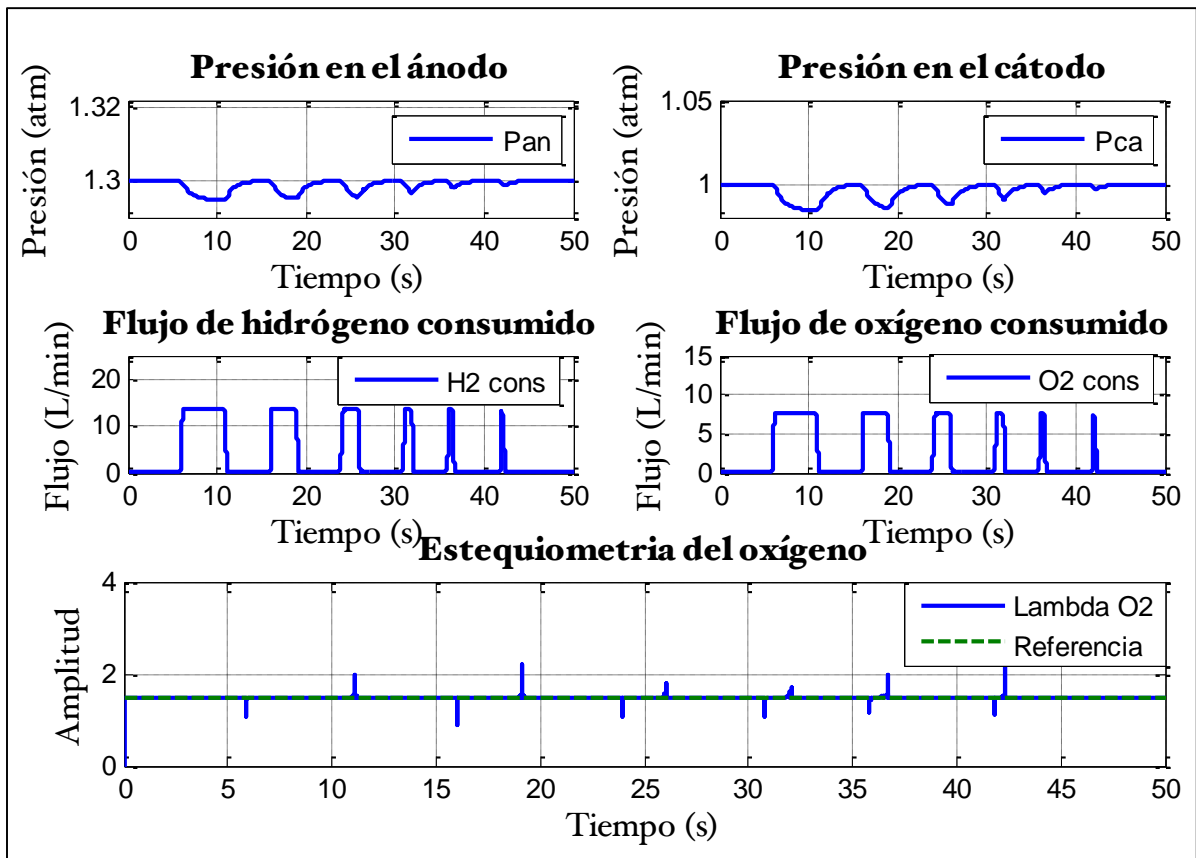


Figura A.7.8 Respuesta fluidica del modelo REM de pruebas de escalones de corriente.

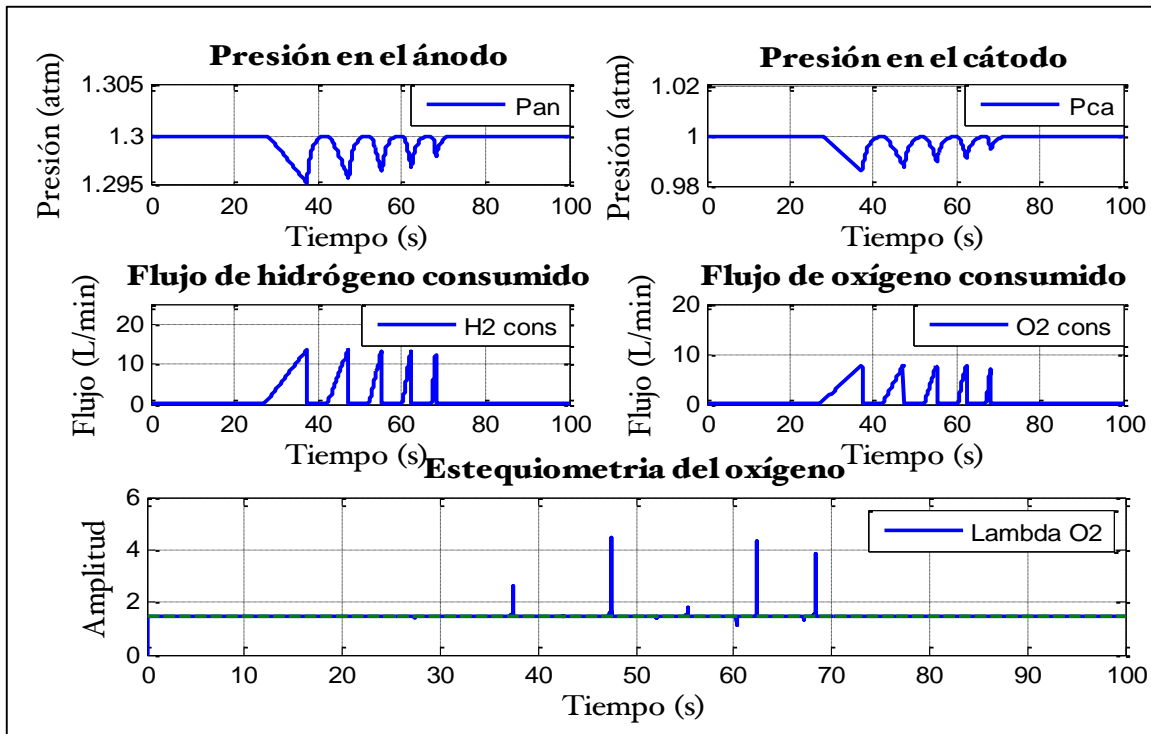


Figura A.7.9 Respuesta fluidica del modelo REM de pruebas de rampas de corriente.

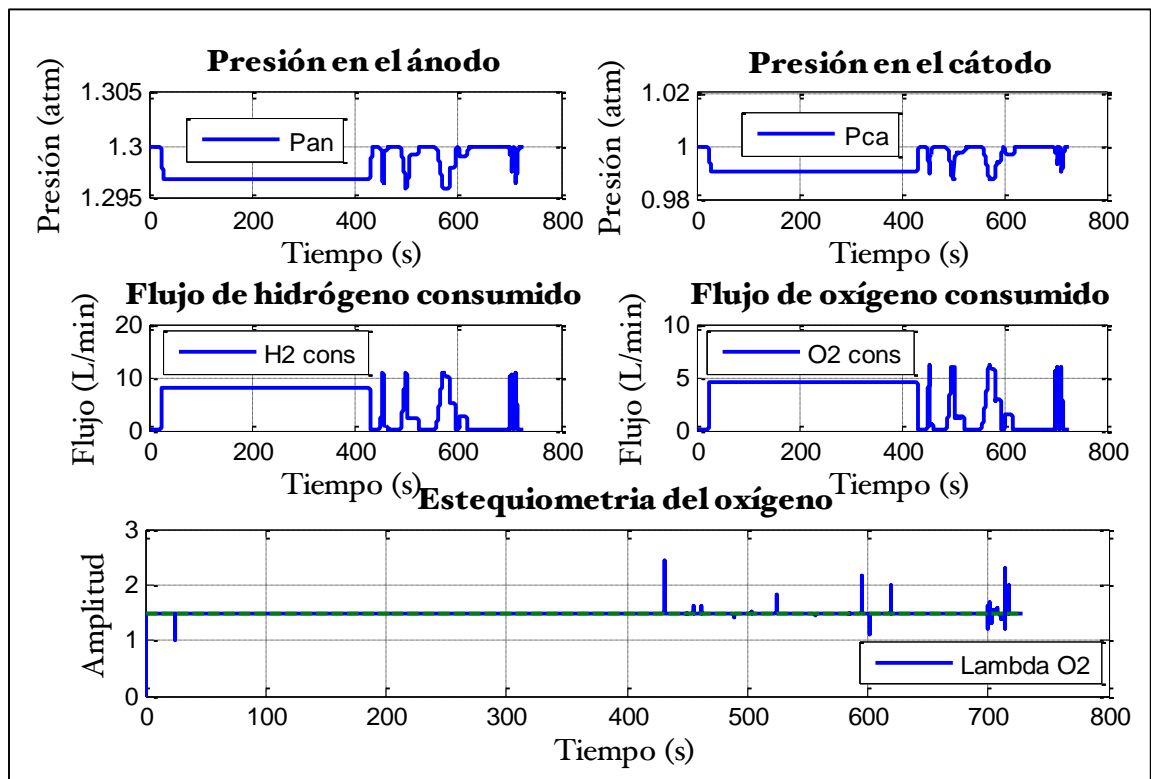


Figura A.7.10 Respuesta fluidica de modelo REM de ciclo NEDC.

