

Universidad de la República.
Facultad de Ingeniería.
Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica, Plan 97.
Tutores: Dr.Ing.Gonzalo Casaravilla. Ing.Andrés Merello.

Celda06: Entrega de Energía a la Red a partir de Celdas de Combustible

Daniel Eduardo Montaldo Iglesias.
Leonardo Andrés Martínez Lembo.
Francisco Javier Souza Pérez.

Montevideo, Agosto de 2007

Agradecimientos

Queremos destacar el interés y apoyo brindado por los tutores Ings. Gonzalo Casaravilla y Andrés Merello a lo largo del proyecto. También deseamos dejar constancia de nuestra gratitud hacia el profesor Dr. Fernando Zinola por la guía proporcionada en los temas relacionados con electroquímica, y a los demás profesores que nos recibieron en las cátedras de electroquímica de las facultades de Ciencias y de Ingeniería.

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo entender conceptualmente el funcionamiento de las celdas de combustible PEMFC¹ de hidrógeno, para poder aprovechar la energía que se desprende de la celda y utilizarla en un sistema de Generación Distribuida (GD).

Es de importancia fundamental encontrar compatibilidad entre la celda de combustible y la red pública, esto implica adecuar la salida de la celda a las especificaciones y normas establecidas de calidad del servicio de distribución por los organismos correspondientes.

Los puntos tratados a lo largo del proyecto son los siguientes:

1. Identificación de un modelo estático y dinámico para la celda.
2. Diseño de una topología de enlace adecuada entre la celda y la red.
3. Caracterización de los aspectos de la calidad de onda.
4. Validación de la topología por medio de simulaciones.
5. Estimación de la viabilidad económica.

Se estudia el principio de funcionamiento de las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), para las cuales se presenta un modelo eléctrico. El mismo fue validado mediante relevamiento de una celda experimental. Además se desarrolla un software de simulación para un stack de celdas, utilizando estos modelos.

Por otro lado, se estudian las diferentes topologías de enlace de celdas de combustible con la red eléctrica. Se desarrolla una propuesta de generación distribuida basada en control de corriente, tanto en la etapa de continua como en la etapa de alterna. En este contexto se estudian los aspectos regulatorios de calidad de energía eléctrica en la red pública.

¹Proton exchange membrane fuel cell (celda de combustible de membrana de intercambio de protones)

Para cumplir con lo anterior se desarrollan en software, el algoritmo de tracking de potencia, el lazo de control de corriente y el generador de pulsos PWM del puente.

Por último, mediante simulaciones se comprueba el correcto desempeño del sistema propuesto, así como el diseño del mismo.

Finalmente, se presenta un panorama sobre los costos de la generación de energía con hidrógeno.

Palabras claves: celdas de combustible PEMFC, modelo eléctrico, generación distribuida, control de corriente, calidad de energía, tracking de potencia, generación de energía con hidrógeno .

Índice general

1. Introducción	1
1.1. ¿Qué es una celda de combustible?	2
1.2. Sistemas de GD.	2
1.3. Estructura del trabajo.	4
2. Modelo eléctrico de la celda de combustible	5
2.1. Principio de funcionamiento	5
2.2. Modelo eléctrico	6
2.2.1. Potencial interno de la celda	7
2.2.2. Caída de voltaje por activación	7
2.2.3. Caída de voltaje por concentración	8
2.2.4. Caída óhmica de voltaje	8
2.2.5. Efecto de carga de doble-capa	8
2.3. Síntesis	9
3. Relevamiento de la celda de combustible	11
3.1. Introducción	11
3.2. Panorama del capítulo	12
3.3. Objetivo	12
3.4. Sistema de medida	13
3.4.1. Materiales utilizados en los experimentos	13
3.4.2. Sistema de Medida	18
3.5. Ensayos	19
3.5.1. Respuesta estática	20
3.5.2. Respuesta escalón	25
3.5.3. Ensayo respuesta en frecuencia	28
3.5.4. Ensayo respuesta triangular	31
3.6. Análisis de datos	33
3.6.1. Datos obtenidos en el ensayo respuesta estática	33
3.6.2. Datos obtenidos ensayo respuesta escalón	36
3.6.3. Datos obtenidos ensayo respuesta frecuencia	42
3.6.4. Datos obtenidos ensayo respuesta triangular	47

3.7. Conclusiones	48
3.7.1. Conclusiones de la experiencia	49
3.7.2. Consideraciones	49
4. Topología de enlace con el inversor	51
4.1. Introducción	51
4.2. Topologías clásicas más usadas	51
4.2.1. Conversor Push Pull	52
4.2.2. Conversor Full Bridge	53
4.3. Push-Pull Vs Full-Bridge	55
4.4. Implementaciones de convertidores DC-DC	56
4.4.1. Push-Pull en la configuración “entrada en paralelo, salida en paralelo (EPSP)”	56
4.4.2. Push-Pull en la configuración “entrada en paralelo, salida en serie (EPSS)”	57
4.4.3. Full Bridge y la configuración Front End	57
5. Calidad de Onda	61
5.1. Introducción	61
5.2. Calidad del servicio de distribución	61
5.2.1. Importancia de la calidad del servicio de distribución	61
5.2.2. Componentes de la calidad del servicio.	62
5.3. Calidad de Onda	63
5.3.1. Calidad de onda en nuestro país, aspectos a controlar	63
5.3.2. Exigencias de calidad de onda	66
6. Propuesta de generación distribuida con celdas de combustible	69
6.1. Introducción	69
6.1.1. Panorama del capítulo	69
6.2. Descripción del sistema	70
6.3. Modelo de la celda en Simulink	71
6.3.1. CdeC y stack	71
6.3.2. Hipótesis de trabajo asumidas para el stack	72
6.3.3. Implementación de stack incluyendo el efecto de la temperatura.	75
6.3.4. Implementación del stack a parámetros constantes y temperatura fija en $T=318$ K.	81
6.4. Tracking de potencia y control de corriente en Simulink	84
6.4.1. Algoritmo de tracking	84
6.4.2. Diseño del conversor DC-DC y controlador de corriente	87
6.5. Etapa Inversion DC/AC	92
6.6. Simulación de la celda, el tracking de potencia y control de corriente	93
6.6.1. Resultados de la simulación con el stack SR_H	94
6.6.2. Resultados de la simulación con el stack MPC	97
7. Simulaciones	101
7.1. Introducción	101
7.2. Simulación en condiciones normales	101
7.2.1. Sistema simulado	101
7.2.2. Entrada al conversor DC-DC	102
7.2.3. Salida del conversor DC-DC	105

7.2.4. Salida del VSI	108
7.3. Comportamiento del sistema frente a problemas en la celda	109
7.3.1. Interrupción de alimentación desde la Celda	110
7.3.2. Caídas de tensión en la celda	113
7.4. Comportamiento del sistema frente a perturbaciones en la red eléctrica	116
7.4.1. Red con armónicos	116
7.4.2. Red con huecos, flicker o desbalances	119
7.5. Conclusiones	123
8. Panorama de los costos para la generación de energía con CdeC	125
8.1. Introducción	125
8.2. Celdas de Combustible en la generación de Potencia estacionaria	125
8.2.1. Generación combinada de calor y potencia con PEMFC	126
8.3. El Hidrógeno, vector de energía	127
8.3.1. Métodos de producción de hidrógeno	129
8.3.2. Métodos de almacenar hidrógeno	130
8.3.3. Costos de la producción de hidrógeno	131
8.4. Costos de la generación de energía con Hidrógeno usando una CdeC	132
8.5. Conclusiones	134
9. Conclusiones	135
A. Esquemáticos de Simulink	139
A.1. Esquemáticos de la celda	139
A.1.1. Stack modelo completo	139
A.1.2. Stack parámetros constantes	145
A.2. Esquemáticos del convertor DC-DC y lazo de control con función de tracking	146
A.3. Esquemáticos del VSI y su control	151
A.4. Modelo del sistema completo	154
B. Abreviaturas	155

Índice de figuras

1.1. Esquema tradicional de generación de energía.	3
1.2. Esquema que incorpora generación distribuida.	3
2.1. Diagrama Electro-químico de las PEMFC.	6
2.2. Modelo eléctrico de las PEMFC.	9
3.1. Modelo eléctrico propuesto.	12
3.2. Esquema del kit didáctico en funcionamiento normal.	14
3.3. Esquema del kit didáctico acondicionado a la experiencia.	15
3.4. Imagen del kit, en esta imagen el ventilador está conectado a la celda en estudio y esta a su vez es alimentada por la celda generadora de hidrógeno.	16
3.5. Imagen de la configuración emisor común, en donde I_b es la corriente de base y I_c es la corriente de colector.	17
3.6. Esquema del sistema de adquisición de datos.	18
3.7. Esquema de conexiones en el cual se distinguen: la F.C.C, las fuentes de Voltaje ($V_{dc} + v_{ac}$ es la fuente generadora de voltaje, V_{cc} fuente de polarización PS 220), la celda, el amperímetro y los canales del adquisidor (Ch1,Ch2,Ch3).	19
3.8. Curva estática de una CdeC, aprecia la zona de pérdidas de activación, la zona de pérdidas óhmica y la zona de pérdidas de concentración.	20
3.9. Variación porcentual de R_{act} , R_{ohm} , R_{conc} para una CdeC cuya respuesta estática es linealizable entre los 5 y 18 A.	22
3.10. Tasa de variación de R_{act} y R_{conc} . Se observa que en la región de corrientes medias ambas derivadas se mantienen en valores casi constantes.	23
3.11. Curva estática relevada por el grupo de trabajo de Fac. Ciencias, también se aprecia la característica de Corriente-Potencia de la celda.	24
3.12. A) Conexionado incluyendo el modelo de la celda, se omite el amperímetro, se ve la corriente de excitación I_{exit} . B) La circuitería opera como una fuente de corriente variable. C) La celda conectada a una fuente de corriente. D) Función de corriente I_{exit} en el experimento de la respuesta escalón.	26

3.13. A) Respuesta esperada de E_{celda} para una entrada escalón. B) Señal de corriente que excita la celda en este ensayo.	28
3.14. Descripción del ensayo de respuesta en frecuencia, en A se observa nuevamente el conexionado, en B se muestran la corrientes de excitación $I(t)$ y la respuesta de la celda $E_{celda}(t)$	29
3.15. Ejemplo de Diagrama de Bode esperado.	31
3.16. A) Respuesta esperada de E_{celda} para una entrada triangular. B) Señal de corriente que carga a la celda en este ensayo.	33
3.17. Señales obtenidas en el experimento de la respuesta estática.	34
3.18. Comparación respuesta estática Fac. Ciencias y respuesta estática obtenida junto con sus respectivas curvas de potencia.	34
3.19. Derivadas de las respuestas estáticas.	35
3.20. Uno de los ensayos de la respuesta escalón, se observa la evolución de E_{celda} con la corriente.	37
3.21. Uno de los escalones obtenidos de las señales mostradas en la fig. 3.6.2.	37
3.22. Ajuste escalón de subida de 350 mA.	38
3.23. Ajuste escalón de subida de 450 mA.	39
3.24. Ajuste escalón de subida de 550 mA.	39
3.25. Ajuste escalón de bajada de 450 mA.	40
3.26. Ajuste escalón de bajada de 550 mA.	40
3.27. Datos adquiridos de frecuencia 0.5Hz.	43
3.28. Datos adquiridos de frecuencia 5Hz.	43
3.29. Datos adquiridos de frecuencia 10Hz.	44
3.30. Ajuste de señal de frecuencia 2Hz.	45
3.31. Ajuste de señal de frecuencia 10Hz.	45
3.32. Ajuste de los datos obtenidos de la respuesta en frecuencia.	46
3.33. Señales ensayo de respuesta triangular 1 hz. Se observa la corriente de excitación y la respuesta de la celda junto con el ajuste usando los parámetros del modelo calculados en el apartado 3.6.2.	47
3.34. Señales ensayo de respuesta triangular 10 hz. Se observa la corriente de excitación y la respuesta de la celda junto con el ajuste usando los parámetros del modelo calculados en el apartado 3.6.2.	48
4.1. Diagrama de bloques del sistema de conexión de la celda de combustible a una carga eléctrica	51
4.2. convertor Push-Pull. Los valores de tensión marcados en la figura corresponden a la tensión que generará la Celda hidrógeno a construirse en F.Ing.[12]	52
4.3. Formas de onda de la tensión a la salida del puente de diodos. No se considera en el análisis la caída de tensión de los diodos	53
4.4. Convertor Full-Bridge. Los valores de tensión marcados en la figura corresponden a la tensión que generará la Celda hidrógeno a construirse en F.Ing.[12]	54
4.5. Formas de onda de la tensión a la salida del puente de diodos. No se considera en el análisis la caída de tensión de los diodos[12]	55
4.6. diagrama del conexionado	56
4.7. diagrama del conexionado	57
4.8. Configuración Front-End con etapas rectificadoras a la salida.	58
4.9. Configuración “EPSS”, (entrada en paralelo, salida en paralelo.	58

5.1. Esquema de la calidad del servicio, [25].	62
6.1. Esquema del sistema completo.	71
6.2. Modelo presentado en [3], para una celda de combustible. Este se asumirá como modelo válido para un stack.	72
6.3. Simulación de la respuesta estática para el stack SR-12 presentado [3].	76
6.4. Evolución de la temperatura SR-12 Simulink, para el ensayo de 6.3.3.	76
6.5. Potencia estática del SR-12 Simulink.	77
6.6. Respuesta dinámica del SR-12 Simulink.	77
6.7. Respuesta estática del stack extrapolado.	79
6.8. Evolución de la temperatura stack extrapolado.	79
6.9. Potencia del stack extrapolado.	80
6.10. Respuesta dinámica del stack extrapolado.	80
6.11. Curva estática del SR-12 original junto con la linealización a parámetros constantes	81
6.12. Curvas de potencia SR-12 y su linealización en la zona de máxima potencia se observa la forma de la curva de potencia.	82
6.13. Respuesta dinámica del SR-12 y el modelo Par.Ctes.	82
6.14. Diferencia entre respuestas dinámicas del SR-12 y el modelo Par.Ctes.	83
6.15. Linealización en la zona de máxima potencia del stack SR-12.	83
6.16. Posicionamiento del tracking en la curva de potencia.	85
6.17. Diagrama de flujo del algoritmo de tracking.	86
6.18. Circuito equivalente de la celda y Full-Bridge, visto desde el primario con las llaves cerradas.	88
6.19. Circuito equivalente cuando las llaves están abiertas.	89
6.20. Ubicación de los polos del sistema controlado.	92
6.21. Respuesta al escalón con los parámetros de diseño.	92
6.22. Esquema del sub sistema CdeC, convertor DC-DC, tracking con PWM, cargado con una fuente de continua.	93
6.23. Corriente de salida del stack bajo el efecto del tracking junto con la I_{ref} calculada para realizar el control.	95
6.24. Temperatura del stack SR_H en la simulación.	95
6.25. Voltaje de salida del stack.	96
6.26. Corriente de salida del convertor DC-DC.	96
6.27. Balance de potencia del sistema.	97
6.28. Corriente de salida del stack bajo el efecto del tracking.	99
6.29. Voltaje de salida del stack.	99
6.30. Corriente de salida del convertor DC-DC.	100
6.31. Balance de potencia del sistema.	100
7.1. Diagrama de bloques de la topología de enlace con la red eléctrica. . .	101
7.2. Corriente de referencia vs. corriente entregada por la CdeC.	102
7.3. Corriente y potencia entregadas por la CdeC.	103
7.4. Imagen ampliada de corriente de referencia vs. corriente entregada por la CdeC.	103
7.5. Tensión en bornes de la CdeC.	104
7.6. Imagen ampliada de la tensión en bornes de la CdeC.	104
7.7. Corriente a la salida del convertor DC-DC.	105

7.8. Tensión a la salida del convertor DC-DC. Observar que la dinámica de control demora por lo menos 4 segundos en asentarse en su valor de régimen.	106
7.9. Imagen ampliada de la corriente entregada por el convertor DC-DC.	106
7.10. Imagen ampliada de la tensión a la salida del convertor DC-DC.	107
7.11. Potencia instantánea entregada por la Celda y potencia instantánea entregada por el convertor DC-DC.	107
7.12. Corriente entregada por el VSI a la red eléctrica.	108
7.13. Potencia entregada por el VSI a la red eléctrica.	109
7.14. Análisis de armónicos de la corriente entregada por el VSI.	109
7.15. Tensión a la entrada del convertor DC-DC.	110
7.16. Corriente de referencia vs. corriente entregada por la celda.	111
7.17. Imagen ampliada de la tensión a la entrada del convertor DC-DC. En la misma se aprecia la descarga del capacitor de entrada.	111
7.18. Tensión a la salida del convertor DC-DC.	112
7.19. Corriente entregada por el convertor DC-DC.	112
7.20. Ciclo de trabajo del PWM. Se observa como el mismo satura al interrumpirse la corriente desde la CdeC.	113
7.21. Tensión a la entrada del convertor DC-DC.	114
7.22. Corriente entregada por la celda y corriente de referencia.	114
7.23. Potencia entregada por la celda.	115
7.24. Tensión a la salida del convertor DC-DC.	115
7.25. Corriente entregada por el convertor DC-DC.	116
7.26. Tensión de la red eléctrica con armónicos.	117
7.27. Corriente entregada por el VSI a la red eléctrica.	117
7.28. Análisis de armónicos de la tensión de red y de la corriente entregada por el VSI.	118
7.29. Corriente entregada por el convertor DC-DC. La misma no se ve afectada por los armónicos introducidos en la red.	118
7.30. Tensión a la salida del convertor DC-DC. La misma no se ve afectada por los armónicos introducidos en la red.	119
7.31. Tensión de la red eléctrica con huecos.	120
7.32. Tensión de la red eléctrica con flicker.	120
7.33. Tensión de la red eléctrica con desbalances.	121
7.34. Corriente entregada por el VSI, conectado a una red con huecos.	121
7.35. Corriente entregada por el VSI, conectado a una red con flicker.	122
7.36. Corriente entregada por el VSI, conectado a una red con desbalances.	122
7.37. Tensión a la entrada del VSI, conectado a la red con huecos. El ripple obtenido es menor a 2 %.	123
8.1. Prototipos de vehículos con CdeC, [19].	126
8.2. Sistema de cogeneración, [7].	127
8.3. Potencial de Hidrógeno.	128
8.4. Ciclo de Hidrógeno.	129
8.5. Producción de Hidrógeno, [16].	129
8.6. Stack tipo S-Series, [22].	133
A.1. Modelo externo, stack con celdas con dinámica térmica.	139
A.2. Modelo completo del stack. En las figs. A.3, A.4, A.5 y A.6 se detallan cada una de sus partes.	140

A.3. Entradas desde el WorkSpace, N y M son los parámetros de extrapolación del stack.	141
A.4. Caídas de voltaje internas.	142
A.5. Circuito termodinámico.	143
A.6. Circuito equivalente.	144
A.7. Modelo externo, stack parámetros constantes.	145
A.8. Modelo interno, stack parámetros constantes $T=318K$	145
A.9. Modelo externo, convertor DC-DC tracking PWM.	146
A.10. Modelo interno, convertor DC-DC tracking PWM.	147
A.11. Lazo de control de corriente del convertor DC-DC. El tracking se detalla en la fig. A.12.	148
A.12. Tracking del convertor DC-DC. El bloque de control de detalla en la fig. A.13.	149
A.13. Código del control de tracking.	150
A.14. Modelo externo, VSI.	151
A.15. Modelo interno del VSI.	152
A.16. Control del VSI.	153
A.17. Sistema completo.	154

Índice de cuadros

1.1. Tipos de celdas de combustible actualmente desarrolladas y sus características.	2
3.1. Relevamiento de respuesta escalón. Escalones de subida.	41
3.2. Relevamiento de respuesta escalón. Escalones de bajada.	41
3.3. Promedio de los valores relevados.	42
3.4. Comparación de resultados entre la respuesta estática y la respuesta escalón.	42
3.5. Parámetros de la respuesta en frecuencia.	46
3.6. Parámetros del modelo de la celda.	46
4.1. Push-Pull vs Full-Bridge: se desprecian las sobretensiones en los arrollamientos producidos en la conmutación, así como la caída de tensión en diodos y mosfets.	55
5.1. Límites de la norma EN50160	67
6.1. Elementos del modelo para el stack SR-12, [3].	73
6.2. Elementos del modelo para el stack SR-12 términos superiores, [3].	73
8.1. Costos de producir Hidrógeno, [20].	132

CAPÍTULO 1

Introducción

Las celdas de combustibles son una tecnología que se perfila como una de las principales fuentes de energía del siglo XXI. En particular las celdas de membrana de intercambio de protones (PEM¹) se presentan como una gran promesa para el uso como fuentes en generación distribuida (GD). Comparadas con otras tecnologías de GD, tales como los molinos viento y los paneles solares, las celdas de combustible PEM tienen la ventaja de poder ser ubicadas en cualquier sitio del sistema de distribución, sin limitaciones geográficas, para lograr el mejor desempeño.

La generación de energía por parte de este tipo de fuentes, denominadas fuentes limpias, y su interacción con los sistemas eléctricos son objeto de investigación sostenida desde hace años en los países desarrollados². Incorporar estos conocimientos, procesarlos y ponerlos a prueba en el problema de generación de energía estacionaria constituyen las metas de este proyecto. A su vez, establecer antecedentes de trabajo sobre los cuales seguir investigando en este campo.

En este marco se establece el proyecto “Celda06: Entrega de Energía a la Red a partir de Celdas de Combustible”. El presente trabajo se propone investigar los aspectos relacionados al comportamiento de las celdas de combustible conectadas a la red de distribución en GD. Se presentan dos líneas de investigación fundamentales que son: el relevamiento de una celda de combustible prototipo, para la cual se valida un modelo eléctrico preestablecido, y la elaboración de una propuesta de GD concreta (utilizando el modelo eléctrico), que se valida mediante simulaciones en Matlab/Simulink.

A los efectos de comprender dos conceptos fundamentales como son las celdas de combustible y los sistemas de GD, se realiza una breve descripción de cada uno de ellos.

¹De sus siglas en inglés Proton Exchange Membrane.

²Las primeras aplicaciones prácticas que tuvieron las celdas de combustible en la generación de potencia eléctrica datan de los comienzos de la era espacial en los programas Gemini y Apollo.

1.1. ¿Qué es una celda de combustible?

Una celda de combustible se puede definir como un dispositivo electro-químico que continuamente transforma energía química en energía eléctrica siempre que se le suministre combustible y oxidante [7].

Existen diversos tipos de celdas de combustible como se ve en el cuadro 1.1, pero todas obedecen al mismo principio de funcionamiento: en el ánodo, un combustible (usualmente hidrógeno) se oxida dando lugar a electrones y protones, y en el cátodo, el oxígeno se reduce obteniéndose como producto agua y energía eléctrica.

Tipo de celda de combustible	Electrolito	Temperatura de operación	Combustible	Eficiencia	Potencia
PEM	Polímero sólido	50-100°C	H_2 puro	35-45 %	5-250kW
AFC	KOH	60-120°C	H_2 puro	35-55 %	< 5kW
PAFC	Ácido fosfórico	$\sim 220^\circ C$	H_2 puro	40 %	200kW
MCFC	Carbonato de litio y potasio	$\sim 650^\circ C$	H_2 puro, CO, CH_4	> 50 %	200kW-MW
SOFC	Oxido sólido	$\sim 1000^\circ C$	H_2 puro, CO, CH_4	> 50 %	2kW-MW

Cuadro 1.1: Tipos de celdas de combustible actualmente desarrolladas y sus características.

Las celdas de combustibles PEM, o simplemente celdas PEM, encuentran mayor utilidad en automóviles, debido a la gran densidad de energía necesaria en esta aplicación, característica que distingue a este tipo de celda. Sin embargo, en la actualidad existen instaladas celdas de 250 kW para generación de energía estacionaria y se están desarrollando celdas de hasta 1 MW.

1.2. Sistemas de GD.

Se denomina generación distribuida a la generación de energía por parte de sistemas de generación conectados directamente a la red de distribución, como las celdas de combustible, molinos de viento, paneles solares, etc., que se caracterizan por tener una capacidad mucho menor a la de los grandes centros de generación (represas hidroeléctricas y centrales termoeléctricas). La fig. 1.1 muestra el esquema tradicional de generación de energía mientras que la fig. 1.2 presenta el esquema con generación distribuida.

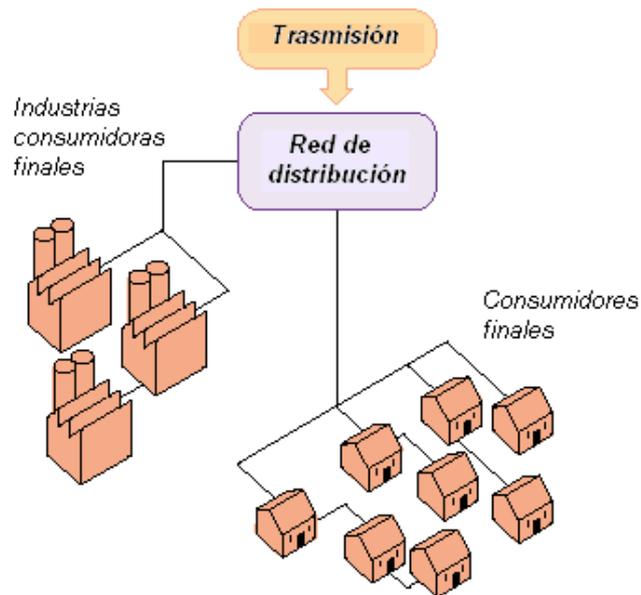


Figura 1.1: Esquema tradicional de generación de energía.

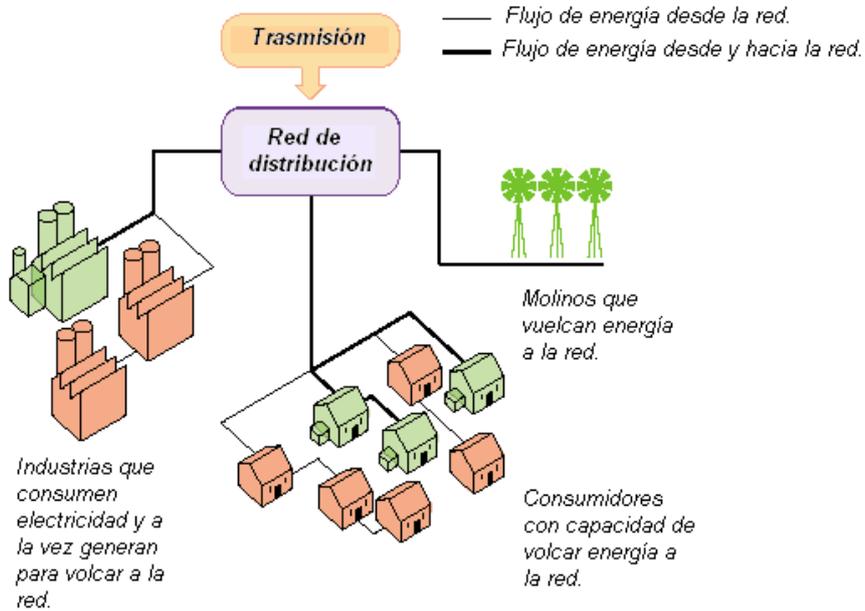


Figura 1.2: Esquema que incorpora generación distribuida.

1.3. Estructura del trabajo.

Se presenta a seguir un resumen de los capítulos que conforman el trabajo.

En el capítulo 2 se aborda el modelo eléctrico sobre el cual se basa el relevamiento de la celda de combustible prototipo. Se desarrollan las principales ecuaciones que modelan los fenómenos químicos y físicos que dan lugar a la generación de energía en una celda. En base a estas se propone el modelo eléctrico que se utiliza en los siguientes capítulos.

En el capítulo 3 se describen los ensayos realizados en el laboratorio con la celda prototipo. Se establecen las hipótesis de ensayo y el fundamento analítico de las experiencias. Se presentan y analizan los datos relevados. Por último se valida el modelo eléctrico discutido en el capítulo 2.

En el capítulo 4 se estudian las diferentes topologías de enlace entre la celda de combustible y la etapa de conversión DC/AC previa a la conexión con la red de distribución. Particularmente se analizan los convertidores DC-DC “Push-Pull” y “Full-Bridge”.

En el capítulo 5 son tratados los aspectos relacionados a la calidad de onda del servicio de distribución de energía eléctrica, los cuales son tenidos en cuenta en el capítulo 7.

En el capítulo 6 se presenta la propuesta de GD elaborada. Se describe en detalle el sistema propuesto y su implementación. Se diseña la topología de enlace analizada en el capítulo 4 y los controles que hacen posible su funcionamiento. Se integra la etapa de conversión DC/AC diseñada por [24] y se diseñan estrategias para las simulaciones finales alguna de las cuales son presentadas.

En el capítulo 7 se presentan las simulaciones realizadas, establecidas para varios escenarios posibles en los que se pone a prueba el desempeño del sistema.

En el capítulo 8 se realiza una estimación de los costos de generación de energía en base a hidrógeno.

Las conclusiones finales se presentan en el capítulo 9.

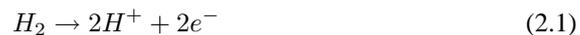
CAPÍTULO 2

Modelo eléctrico de la celda de combustible

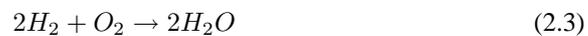
En este capítulo se intentará encontrar un modelo eléctrico lineal para las celdas de combustible. En particular se estudiarán las celdas PEMFC, de hidrógeno. Para ello se presentará el principio de funcionamiento de la celda y las ecuaciones que la gobiernan.

2.1. Principio de funcionamiento

Las celdas de combustible de hidrógeno basan su principio de funcionamiento en las reacciones de oxidación del hidrógeno y la reducción del oxígeno:



Cuya reacción global es:



Las celdas de combustible tienen como propiedad el poder aprovechar la energía liberada en la reacción, en la forma de energía eléctrica. Cabe señalar que el residuo de la reacción es H_2O , por lo tanto no contamina el medio ambiente, a diferencia de los combustibles fósiles.

En particular las PEMFC utilizan como electrolito una membrana especial llamada "Proton Exchange Membrane (PEM)" que posee la capacidad de conducir protones (H^+) impidiendo el pasaje de cualquier especie química. A su vez utilizan tanto en el ánodo como en el cátodo Platino (Pl) como catalizador. En la figura 2.1 se muestra su diagrama de funcionamiento:

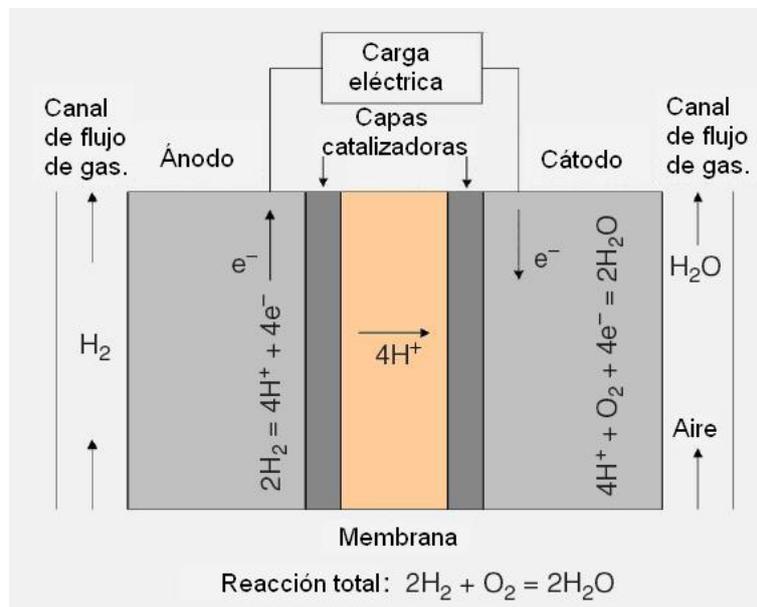


Figura 2.1: Diagrama Electro-químico de las PEMFC.

Una de las ventajas de las PEMFC es su alta densidad de energía por unidad de área, que es incluso hasta un orden de magnitud mayor que los otros tipos de celdas de combustible. Además, estas celdas trabajan a bajas temperaturas (menores a $100^\circ C$).

Como desventaja, el uso del platino como catalizador y la membrana PEM, se reflejan en un elevado costo de la celda.

2.2. Modelo eléctrico

En esta sección se presentan las ecuaciones electro-químicas que gobiernan el funcionamiento de la PEMFC, así como las simplificaciones realizadas, concluyendo con un modelo eléctrico dinámico, que si bien no es lineal, se intentará linealizar para pequeña señal en los siguientes capítulos.

A continuación se presenta el modelo obtenido en [3]. Para simplificar el análisis, se realizan las siguientes suposiciones:

1. Análisis unidireccional.
2. Gases ideales y uniformemente distribuidos.
3. Presión constante en los canales de circulación de los gases.
4. El combustible hidrógeno es húmedo, y el oxidante es aire húmedo. Se asume que la presión del vapor de agua en el ánodo es el 50 % de la presión de vapor saturado, mientras que la presión efectiva del agua en el cátodo es del 100 %.

5. La celda de combustible trabaja a temperaturas menores a 100°C, y el producto de la reacción se encuentra en estado líquido.
6. Las propiedades termodinámicas se evalúan en la temperatura media de la celda (o eventualmente un stack de celdas), la cual se considera uniforme.
7. Los parámetros obtenidos para una celda individual se pueden agrupar para representar un stack.

2.2.1. Potencial interno de la celda

La ecuación 2.3 describe la reacción completa de la PEMFC. Teniendo en cuenta la suposición 5, se obtiene la siguiente ecuación de Nernst [6], para el potencial de circuito abierto de la celda:

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0,5}] \quad (2.4)$$

donde R es la constante de Regnault, T es la temperatura en Kelvin, F es la constante de Faraday y $E_{0,cell}$ es función de la temperatura y puede ser expresado de la siguiente manera [8]:

$$E_{0,cell} = E_{0,cell}^0 - k_E(T - 298) \quad (2.5)$$

donde k_E es una constante empírica expresada en Volts/K, y $E_{0,cell}^0$ es el potencial de referencia en condiciones normales, temperatura ambiente de 298K y presión de 1 atmósfera. Para simplificar el análisis se sustrae un voltaje $E_{d,cell}$ del lado derecho de la ecuación 2.4 para considerar el efecto de los retardos en los flujos del combustible y el oxidante, debido a los cambios de carga en corriente. Por lo tanto en estado estacionario $E_{d,cell}$ es igual a cero, pero durante los transitorios se puede expresar de la siguiente manera [3]:

$$E_{d,cell}(s) = \lambda_e I(s) \frac{\tau_e s}{\tau_e s + 1} \quad (2.6)$$

donde τ_e es el retardo total del flujo. Por lo tanto el potencial interno de la celda queda expresado de la siguiente manera:

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0,5}] - E_{d,cell} \quad (2.7)$$

al mismo hay que sustraerle las pérdidas de activación, concentración y óhmicas, así como el efecto de capacitor de doble capa, que se estudian a continuación.

2.2.2. Caída de voltaje por activación

La caída de voltaje por activación está dada por la ecuación de Tafel [7]:

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha z F} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = T \cdot [a + b \ln(I)] \quad (2.8)$$

donde α es el coeficiente de transferencia de electrones, z el número de electrones que participan, a y b son términos constantes en Volt por Kelvin (Volts/K) y finalmente I_0 es la corriente de intercambio.

En [8] se presenta una variante a esta ecuación:

$$V_{act} = \eta_0 + (T - 298) \cdot a + T \cdot b \ln(I) = V_{act1} + V_{act2} \quad (2.9)$$

donde $V_{act1} = \eta_0 + (T - 298).a$ es el efecto de la temperatura interna, mientras $V_{act2} = T.b \ln(I)$ depende de la temperatura y corriente. Despreciando el efecto de la temperatura en V_{act1} , la caída de activación puede representarse electricamente por una resistencia con la siguiente expresión:

$$R_{act} = \frac{V_{act2}}{I} = \frac{T \cdot b \ln(I)}{I} \quad (2.10)$$

Cabe señalar que esta caída de potencial es muy pronunciada en la zona de baja carga (corrientes cercanas a cero), mientras que permanece constante para altas corrientes.

2.2.3. Caída de voltaje por concentración

Esta caída se produce durante el proceso de reacción, cuando los flujos lentos de reactivos son insuficientes para igualar las altas corrientes exigidas. El potencial de concentración de la celda de combustible se puede expresar como [7], [6]:

$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{limit}}\right) \quad (2.11)$$

donde I_{limit} es la corriente límite de la celda. Esto se puede modelar electricamente con una resistencia de valor:

$$R_{conc} = \frac{V_{conc}}{I} = -\frac{RT}{zFI} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{limit}}\right) \quad (2.12)$$

A diferencia de la activación, la caída de concentración es muy pronunciada en la zona de altas corrientes, siendo esta la principal causa de la limitación de la potencia que puede entregar la celda.

2.2.4. Caída óhmica de voltaje

La caída óhmica de una PEMFC consiste en la resistencia de la membrana, la conductancia entre la membrana y los electrodos, y la resistencia de los electrodos. Se puede expresar como [8]:

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + k_{RI}I - k_{RT}T \quad (2.13)$$

donde R_{ohm0} es la parte constante de R_{ohm} , y k_{RI} , k_{RT} son coeficientes de corrección de R_{ohm} con el valor de I y T respectivamente.

2.2.5. Efecto de carga de doble-capa

En una PEMFC, los dos electrodos están separados por una membrana sólida, ver figura 2.1, la cual solo permite el pasaje de los iones H^+ , bloqueando el flujo de electrones. Estos últimos fluyen desde el ánodo a través de la carga externa y se reagrupan con los protones del hidrógeno en la superficie del cátodo. Por lo tanto dos capas cargadas con polaridades opuestas se forman a través de la frontera entre la porosidad del cátodo y la membrana. Esta capa conocida como “doble-capa electroquímica” almacena energía y se comporta como un capacitor, que denominaremos como Cdc.

De esta manera se obtiene el circuito equivalente eléctrico de la fig. 2.2. En donde se distinguen los elementos del modelo analizados anteriormente. Más precisamente se incluyen las pérdidas de concentración activación y ohmicas modeladas como las resistencias R_{conc} , R_{act} y R_{ohm} respectivamente, el efecto de carga en la doble capa electroquímica modelado por el condensador C_{dc} y el potencial interno de la celda E_{cell} .

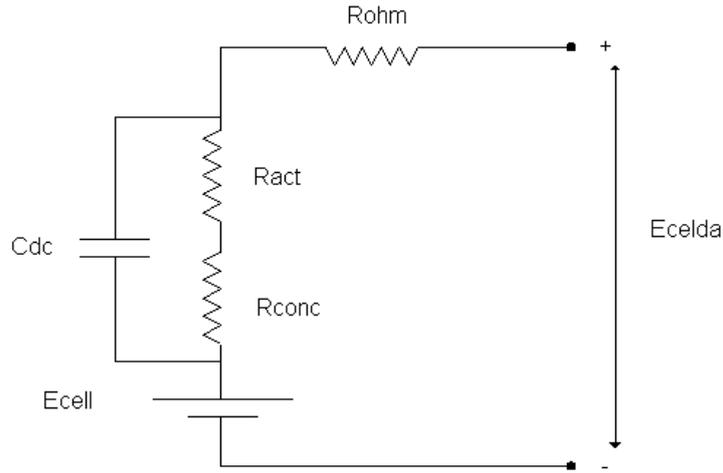


Figura 2.2: Modelo eléctrico de las PEMFC.

2.3. Síntesis

En este capítulo se presentó el modelo obtenido en [3], que consiste en un modelo eléctrico no lineal de la celda, ya que tanto las resistencias como el potencial interno son función de la corriente y la temperatura interna. Para simplificar el estudio, en los siguientes capítulos se trabajará con la linealización para pequeña señal del modelo de la figura 2.2, tomando los valores E_{cell} , R_{ohm} , R_{act} , R_{conc} y C_{dc} constantes. También se agrupan las resistencias R_{act} y R_{conc} en una sola resistencia que se llamará R_{ca} , y cuyo valor será $(R_{conc} + R_{act})$ evaluados en la zona de máxima potencia, de manera de obtener un modelo para pequeña señal en torno a este punto.

CAPÍTULO 3

Relevamiento de la celda de combustible

3.1. Introducción

En [2], se presenta un sistema de generación distribuida basado en celdas de combustible PEMFC. En este artículo los autores validan en base al stack Avista Labs SR-12, como modelo eléctrico para las celdas de combustible (de ahora en más CdeC) el circuito eléctrico mostrado en la fig 3.1. En [3] se deduce este modelo a partir de los fundamentos electroquímicos que rigen el comportamiento de las CdeC.

Se dispone de una CdeC experimental de hidrógeno ¹, para la cual se desea encontrar un modelo eléctrico que describa la dinámica de la celda ante cambios de carga. La propuesta es el modelo de la fig. 3.1. Para esto se realizan diferentes experiencias con la celda de hidrógeno con el fin de analizar su comportamiento en régimen estacionario así como los transitorios, para de esta manera consolidar el modelo lineal de pequeña señal propuesto, el cual se adoptará para describir la dinámica de las CdeC ante cambios de carga.

¹Kit didáctico manufacturado por HelioCentris

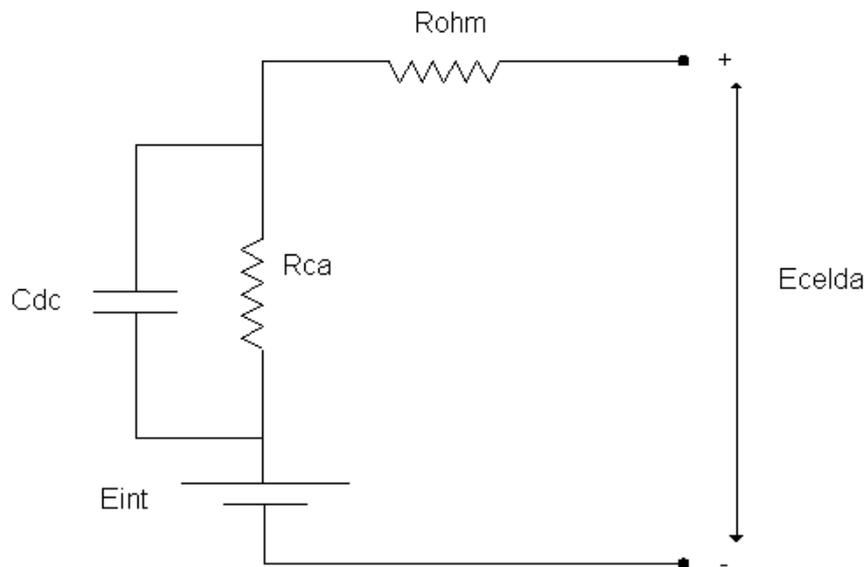


Figura 3.1: Modelo eléctrico propuesto.

En el modelo de la fig. 3.1 se incluye; una fuente de voltaje D.C denominada E_{int} , que representa el voltaje interno de la celda liberado por la reacción electroquímica, tres resistencias R_{conc} , R_{act} , R_{ohm} , las cuales modelan las pérdidas de concentración, activación y óhmicas respectivamente, un condensador C_{dc} el cual modela el efecto de acumulación de carga en la doble capa. En el capítulo 2 se describieron con mayor precisión los fundamentos de este modelo.

3.2. Panorama del capítulo

El presente capítulo es un informe de la experiencia realizada en el laboratorio con la celda de hidrógeno. En el apartado 3.3 se describen los objetivos generales de la experiencia y en el apartado 3.4 se describen el sistema de medida así como el procedimiento general para la adquisición de datos. En el apartado 3.5 se describen cada uno de los experimentos realizados, y se presentan los datos esperados para cada ocasión. Estos últimos se comparan con los datos obtenidos en el apartado 3.6 y finalmente en el apartado 3.7 son presentadas las conclusiones de la práctica realizada con la celda.

3.3. Objetivo

1. Validar el modelo eléctrico propuesto para la CdeC experimental de hidrógeno del kit didáctico.

Como se explica en el apartado 3.1 se propone el modelo de la fig. 3.1 presentado en [3]. El objetivo es encontrar los parámetros del modelo eléctrico de la CdeC en estudio.

2. Comparar los datos obtenidos con los ensayos realizados por el grupo de Facultad de Ciencias².

El grupo de trabajo de Facultad de Ciencias ha realizado múltiples experiencias con esta celda. Entre las más importantes se encuentra el relevamiento de la curva estática utilizando un potenciostato. Se debe comparar el relevamiento de esta curva obtenido en Facultad de Ciencias con el que se obtenga en esta experiencia. Una breve descripción del relevamiento realizado en Facultad de Ciencias y sus diferencias con el obtenido se explican en el apartado 3.5.1.

3.4. Sistema de medida

El relevamiento de la CdeC experimental se realiza conectando una fuente de corriente controlada por tensión en bornes de la CdeC. Esta fuente de corriente constituye la carga eléctrica y se controla mediante un generador de señales para obtener corrientes sinusoidales, escalones y triangulares. La respuesta de la CdeC frente a solicitaciones de carga de este tipo se adquieren para su posterior análisis.

Seguidamente indican los equipos y materiales empleados así como sus características. Se explica como son conectados entre sí de manera de realizar las adquisiciones y medidas.

3.4.1. Materiales utilizados en los experimentos

Los materiales a utilizar serán:

- Kit didáctico de la celda de hidrógeno.
- Generador de señales.
- Fuente de polarización
- Fuente controlada de corriente (F.C.C).
- Sistema de adquisición de señales.
- Multímetros digitales.
- Cables y conectores.
- PC para el manejo de datos.

Cada uno de estos elementos se describen en detalle a continuación, con la excepción de los cables y conectores, y el PC para el manejo de datos, los cuales no requieren de mayor profundización.

²Estudiantes y docentes de la Cátedra de Electroquímica que experimentaron con el kit.

Kit didáctico de la celda de hidrógeno.

El kit didáctico está compuesto por:

- Panel fotovoltaico.
- Fuente de luz.
- Celda de combustible generadora de hidrógeno³
- Celda de combustible generadora de corriente eléctrica (“celda en estudio”).
- Ventilador (carga).

El panel fotovoltaico, la fuente de luz y la celda generadora de hidrógeno, son utilizados en conjunto para producir hidrógeno y oxígeno. La fuente de luz incide en el panel generando energía eléctrica que utiliza la celda generadora de hidrógeno para realizar la electrólisis del agua. En la fig. 3.2 se observa una esquema del kit en situación normal de funcionamiento.

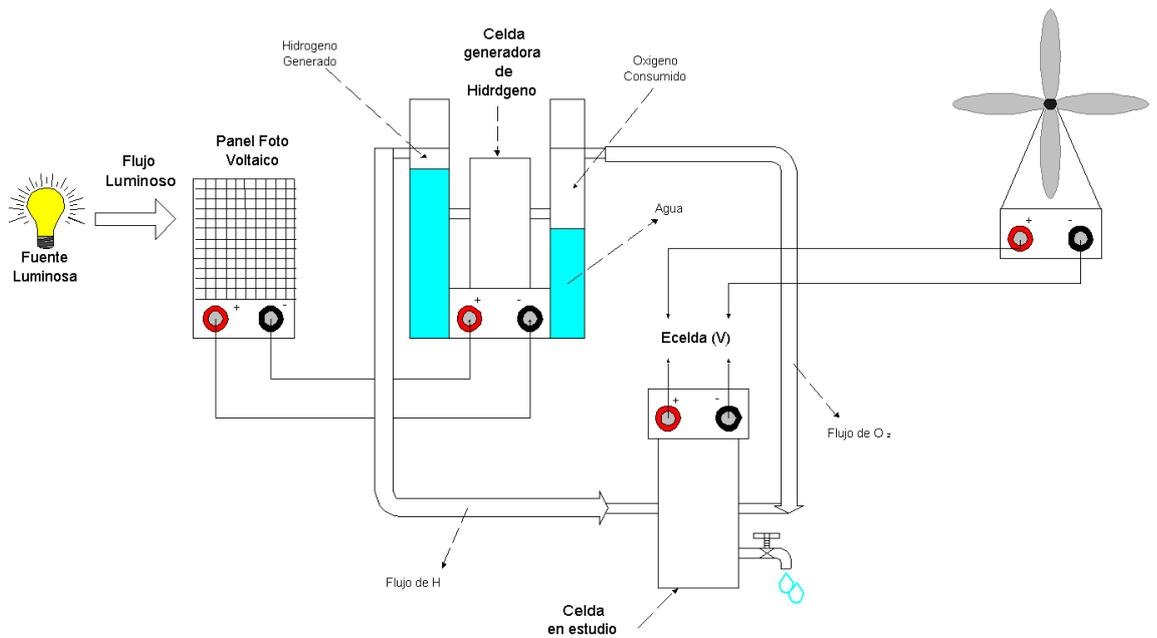


Figura 3.2: Esquema del kit didáctico en funcionamiento normal.

La celda generadora de corriente es el objeto a estudio, de aquí en adelante nos referiremos a esta simplemente como “celda”. La celda utiliza el hidrógeno y oxígeno proveniente del conjunto anteriormente mencionado (fuente de luz, panel, celda generadora de hidrógeno), que produce estos gases. La electricidad aparece como la diferencia de potencial E_{celda} en la fig. 3.2, esta alimenta la carga de la celda, en la citada imagen el ventilador que está incluida en el kit es la carga electromecánica de la celda

³Aunque no se explicita, esta celda genera mediante electrólisis tanto hidrógeno como oxígeno que alimentan a la celda en estudio (celda generadora de corriente eléctrica).

y ayuda a visualizar el funcionamiento de el kit. Sobre el potencial E_{celda} es que se realizan las medidas y con el cual se valida el modelo propuesto.

En esta experiencia no se utiliza el ventilador, como se muestra en la fig. 3.3 la carga de la celda es implementada por una fuente controlada de corriente (F.C.C). En el relevamiento no se utiliza el panel fotovoltaico sino que se alimenta a la fuente generadora de hidrógeno directamente de la alimentación de corriente de una fuente Tektronix PS 220 DC Power Supply, ver fig 3.3.

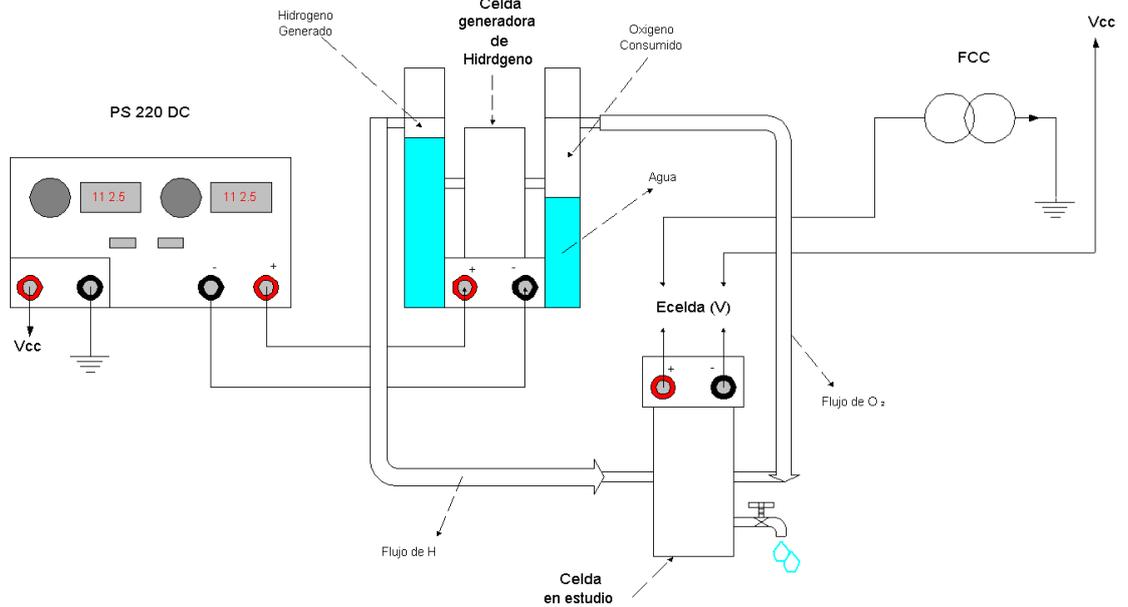


Figura 3.3: Esquema del kit didáctico acondicionado a la experiencia.

En la fig. 3.4 se muestra una vista real de la celda en estudio y alguno de los componentes del kit.

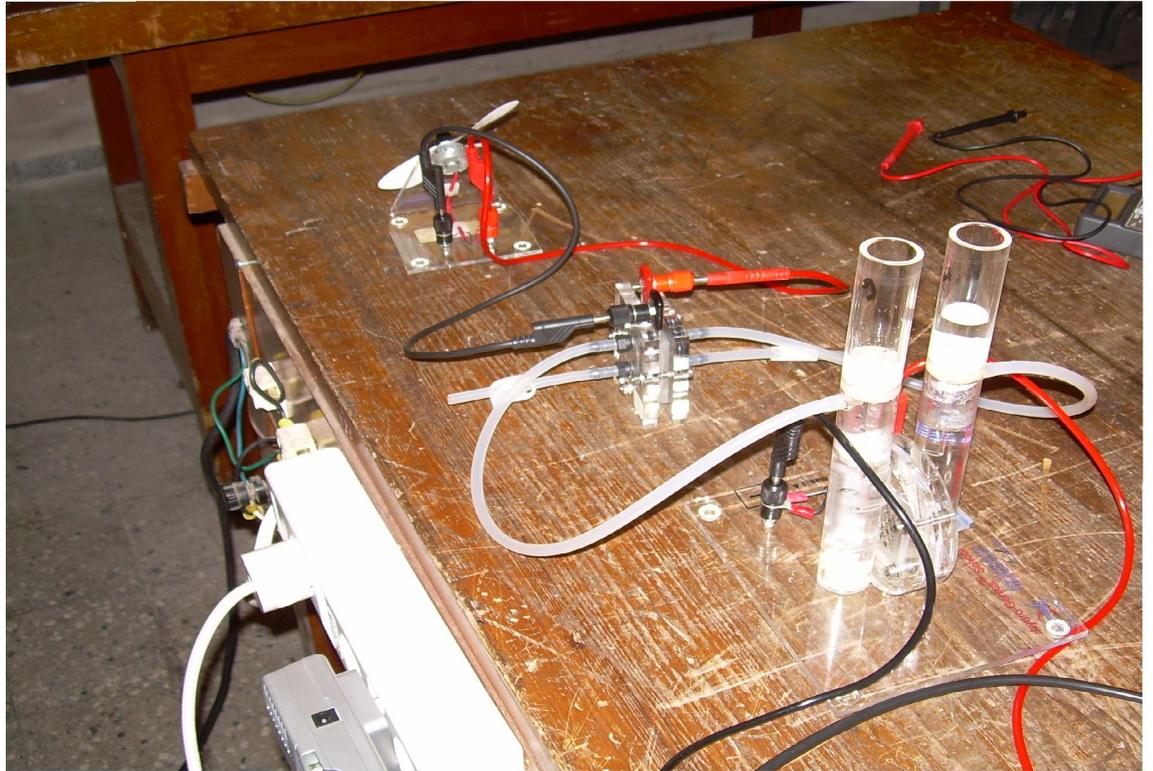


Figura 3.4: Imagen del kit, en esta imagen el ventilador está conectado a la celda en estudio y esta a su vez es alimentada por la celda generadora de hidrógeno.

Generador de señales

El generador de señales puede generar voltajes de continua, ondas sinusoidales, ondas cuadradas y ondas triangulares. Se usa para inyectar las señales de control a la F.C.C logrando así obtener las formas de onda de corriente deseadas para cada uno de los ensayos que se describen en el apartado 3.5. El generador de señales utilizado es Tektronix CFG 250.

Fuente controlada de corriente (F.C.C)

Como fuente de corriente se utiliza un transistor BJT-NPN BC-548 en configuración de emisor común, la que se muestra en la fig. 3.5. Se utiliza una resistencia variable R_p de valor nominal $1k\Omega$ para limitar la corriente de la base [1].

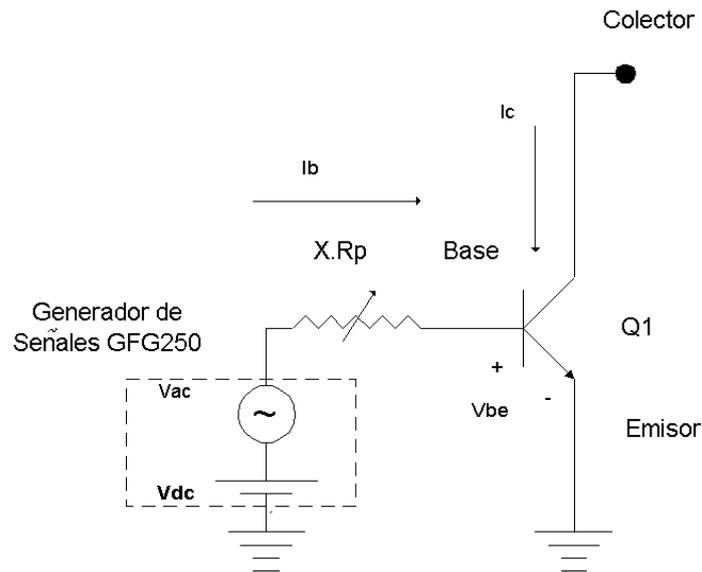


Figura 3.5: Imagen de la configuración emisor común, en donde I_b es la corriente de base y I_c es la corriente de colector.

El generador de señales CFG 250 descrito anteriormente se encarga de polarizar la base del transistor $Q1$ con su voltaje de continua, de manera que este opere en su zona activa, y además inyecta voltaje de señal, produciendo una corriente amplificada en el colector. La corriente de base I_b se puede escribir como:

$$I_b = \frac{V_{dc} + V_{ac} - V_{be}}{xR_p} \quad (3.1)$$

donde V_{dc} es el voltaje de continua de polarización y V_{ac} es el voltaje de señal proporcionados por el generador de señales. V_{be} es el voltaje de base emisor del transistor el cual es constante, y x es la fracción de R_p ajustable manualmente. La corriente del colector es una función de V_{dc} , V_{ac} y la resistencia variable R_p , dado que en zona activa de $Q1$:

$$I_c = \beta \cdot I_b \quad (3.2)$$

De esta manera con el amplificador de emisor común se obtiene una F.C.C, la cual se utiliza para inyectar distintas corrientes en la celda.

Fuente de Polarización

Como fuente de polarización del circuito de emisor común se utiliza una fuente de voltaje variable Tektronix PS 220 DC Power Supply, esta fuente aparece como V_{cc} en la imagen de la fig. 3.7.

Sistema de adquisición de señales

Para la adquisición de datos se utiliza una tarjeta adquisidora Digital National Instruments PC-LPM-16. En este caso se utilizan tres de los cuatro canales de adquisición disponibles para almacenar las señales requeridas. Los datos obtenidos en los canales de adquisición de la tarjeta son almacenados en el PC mediante programa desarrollado en el entorno LabView. En la fig. 3.6 se muestra un esquema del equipo de adquisición conectado al PC.

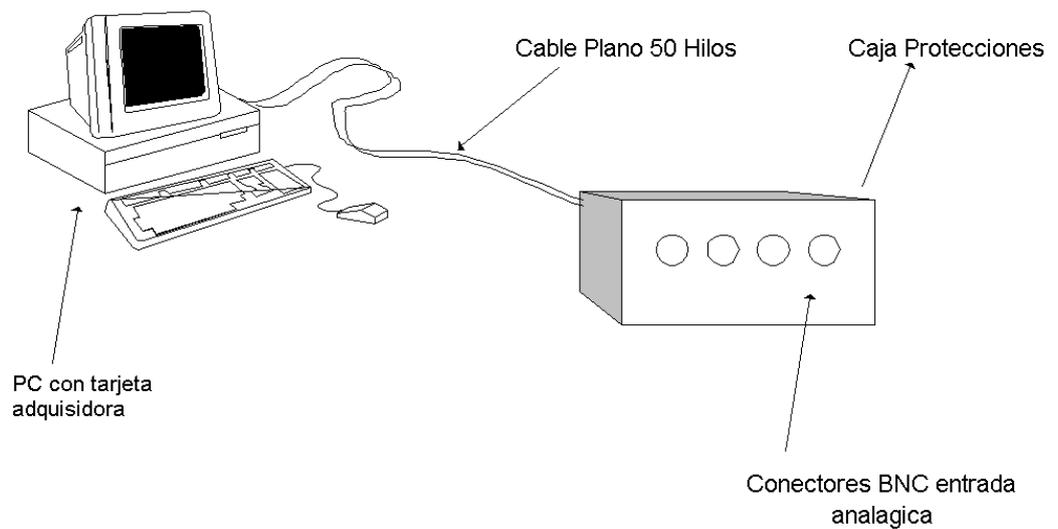


Figura 3.6: Esquema del sistema de adquisición de datos.

Multímetros digitales

Se utilizan dos multímetros digitales Tektronix CDM 250. Uno cumple la función de voltímetro para la medida de voltajes de polarización del transistor $Q1$ entre otros, y el otro cumple la función de amperímetro, ver el apartado 3.4.2.

3.4.2. Sistema de Medida

Para la realización de la experiencia el esquema de conexiones es el mostrado en la fig. 3.7.

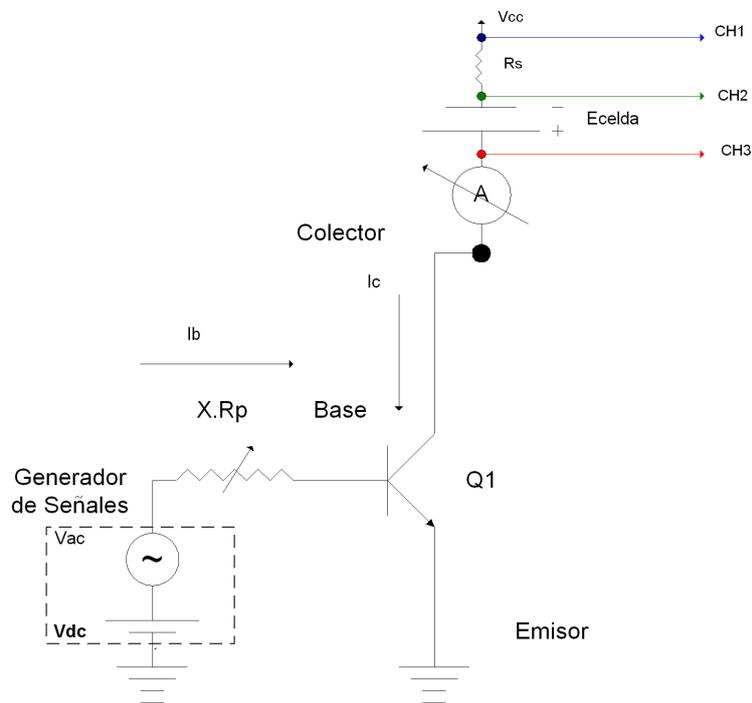


Figura 3.7: Esquema de conexiones en el cual se distinguen: la F.C.C, las fuentes de Voltaje ($V_{dc} + v_{ac}$ es la fuente generadora de voltaje, V_{cc} fuente de polarización PS 220), la celda, el amperímetro y los canales del adquisidor (Ch1,Ch2,Ch3).

El borne negativo de la celda (E_{celda}^-), se conecta a la fuente de polarización por medio de dos resistencias de 1Ω (1 %) conectadas en paralelo formando una resistencia de 0.5Ω , la cual aparece representada en la imagen como R_s . El borne positivo de la celda (E_{celda}^+) se conecta al colector del transistor $Q1$ de la F.C.C, ver fig. 3.7.

Los canales de adquisición se utilizan para almacenar las señales de voltaje en bornes de la celda E_{celda} y la corriente I_c , corriente del colector de $Q1$ entregada por la celda. Como se observa en la fig. 3.7 las señales adquiridas no son directamente I_c y E_{celda} , pero operando sobre los datos almacenados se puede obtener E_{celda} e I_c como:

$$E_{celda} = (CH3 - CH2) \quad (3.3)$$

$$I_c = (CH1 - CH2)/R_s \quad (3.4)$$

3.5. Ensayos

A continuación se profundiza en las características que se desean conocer de la celda, así como en el procedimiento utilizado para obtenerlas. Para todos los ensayos el conexionado de los materiales es el que se detalla en el apartado 3.4.2.

3.5.1. Respuesta estática

Definición de respuesta estática

Se asume como respuesta estática la característica corriente voltaje en ausencia de transitorios. La celda de combustible es una entidad electroquímica, cuyo voltaje de salida E_{celda} , depende de las presiones de los gases H_2 y O_2 , de la temperatura ambiente⁴ y de la corriente de la celda I_c [3]. Suponiendo que las temperaturas y las presiones de los gases permanecen constantes, E_{celda} depende solamente de la corriente I_c , y viceversa. Al aparecer un cambio en una de estas dos variables, por ejemplo en E_{celda} , la corriente variará desde el valor original hasta un valor de equilibrio con el correr del tiempo. Este valor de equilibrio de la corriente depende del valor final de E_{celda} , bajo la hipótesis de mantener incambiadas las otras variables. En este ensayo no se tendrán en cuenta los valores correspondientes a los transitorios, sino solo el valor final de equilibrio. El tema de los transitorios será estudiados en los demás ensayos.

La respuesta estática se representa en una gráfica I_c contra E_{celda} como por ejemplo la que se muestra en la fig. 3.8. En esta imagen se observa una respuesta estática genérica de una celda individual de 0.4 W cuyos detalles se explican a continuación.

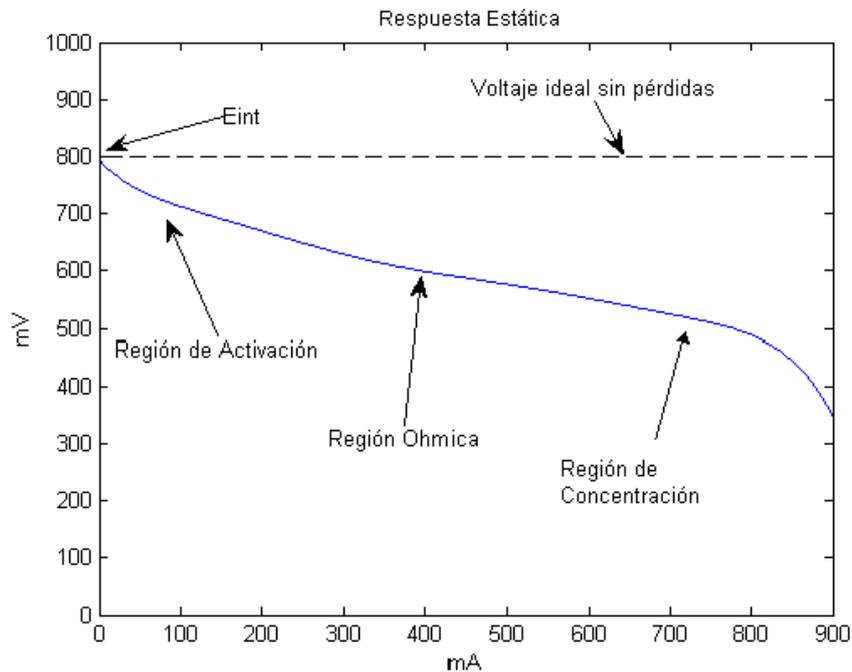


Figura 3.8: Curva estática de una CdeC, aprecia la zona de pérdidas de activación, la zona de pérdidas óhmica y la zona de pérdidas de concentración.

⁴La temperatura interior es una variable interna del modelo. Se asume que la temperatura interior de la celda es constante e igual a la temperatura ambiente, despreciando la termodinámica de la celda debido a la baja potencia de trabajo.

En la fig. 3.8 se aprecia un ejemplo de respuesta estática para una CdeC. En esta figura se denomina E_{int} al voltaje de vacío de la celda. En la región de bajas corrientes, se aprecian las pérdidas de activación, las cuales se modelan como una resistencia, R_{act} :

$$R_{act} = \frac{T \cdot b \ln(I)}{I} \quad (3.5)$$

en donde T es la temperatura interna de la celda en Kelvin, b es un término constante en la ecuación de Tafel en Volts/K e I es la corriente de carga en Amperes [3]. En la región media de corrientes, se aprecian las pérdidas óhmicas, que se modelan por la resistencia R_{ohm} :

$$R_{ohm} = R_{ohm_0} + k_{RI}I - k_{RT}T \quad (3.6)$$

en donde k_{RI} y k_{RT} son dos constantes empíricas y R_{ohm_0} es constante [3]. Finalmente en la región de altas corrientes de la respuesta estática se muestran las pérdidas de concentración, modeladas por la resistencia R_{conc} , mediante la ecuación:

$$R_{conc} = -\frac{RT}{zFI} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{limit}}\right) \quad (3.7)$$

en donde R es la constante de Regnault ($R = 8,3143J/mol.k$), z es el número de electrones participantes, F es la constante de Faraday ($F = 96487Coulomb/mol$) y I_{limit} es la máxima corriente que puede entregar la celda [3].

A continuación en la fig. 3.9 se muestran las gráficas de las variaciones porcentuales de las funciones R_{act} , R_{ohm} y R_{conc} en función de la corriente I para un stack de celdas de 500 W, [3]. Estas gráficas se obtienen de las ecuaciones (3.5) a (3.7), a temperatura ambiente ($T = 298K$) y normalizando (3.5) a (3.7) entre su valor máximo correspondiente en el rango de corrientes, con el objeto de mostrar el peso relativo de cada una de estas tres resistencias en la respuesta estática.

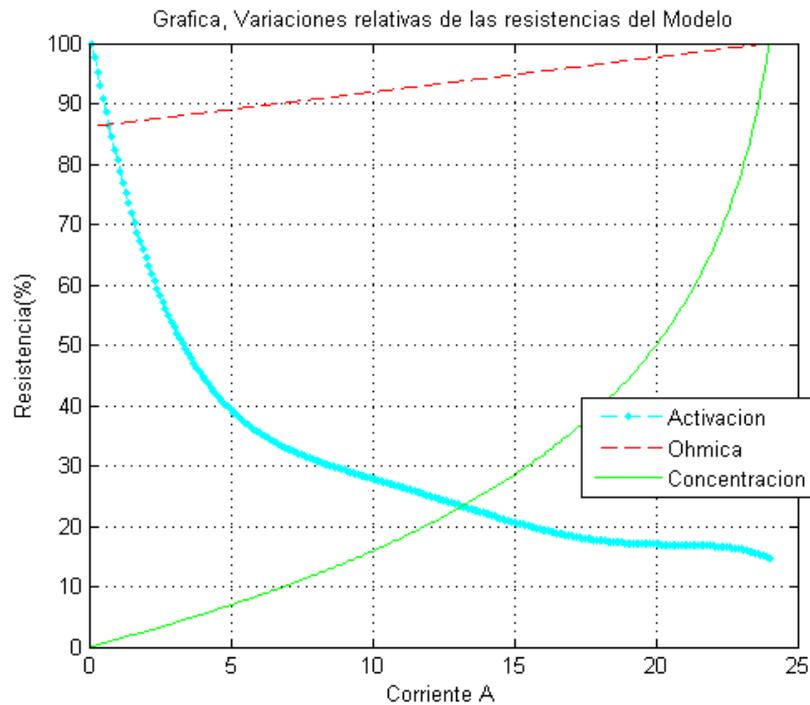


Figura 3.9: Variación porcentual de R_{act} , R_{ohm} , R_{conc} para una CdeC cuya respuesta estática es linealizable entre los 5 y 18 A.

En la fig. 3.9 se observa que, en las regiones de bajas y altas corrientes, es donde las pérdidas de activación y concentración respectivamente tienen mayor peso relativo comparado con el resto del rango. Esto se refleja en la gráfica de la respuesta estática dado que en estas zonas se denotan pendientes menos lineales, ver fig. 3.8.

También se observa una región de corrientes medias en la que estas dos resistencias están por debajo del 40% de su máximo valor. Esta zona se denomina zona ohmica. En la fig. 3.10 se observa las derivadas de las variaciones porcentuales de R_{act} y R_{conc} . En esta imagen se muestra que su tasa de cambio se mantiene prácticamente constante entre los 5 y 18A. Por la cual R_{act} y R_{conc} (y por lo tanto su suma) en la zona óhmica tienen un comportamiento prácticamente lineal.

El comportamiento de las resistencias R_{act} , R_{ohm} y R_{conc} determina la forma de la respuesta estática. Se espera un comportamiento de la respuesta estática de la celda objeto a estudio como el que se muestra en la fig. 3.8, lo que garantiza la existencia de una zona óhmica en donde es posible linealizar las resistencias R_{act} y R_{ohm} .

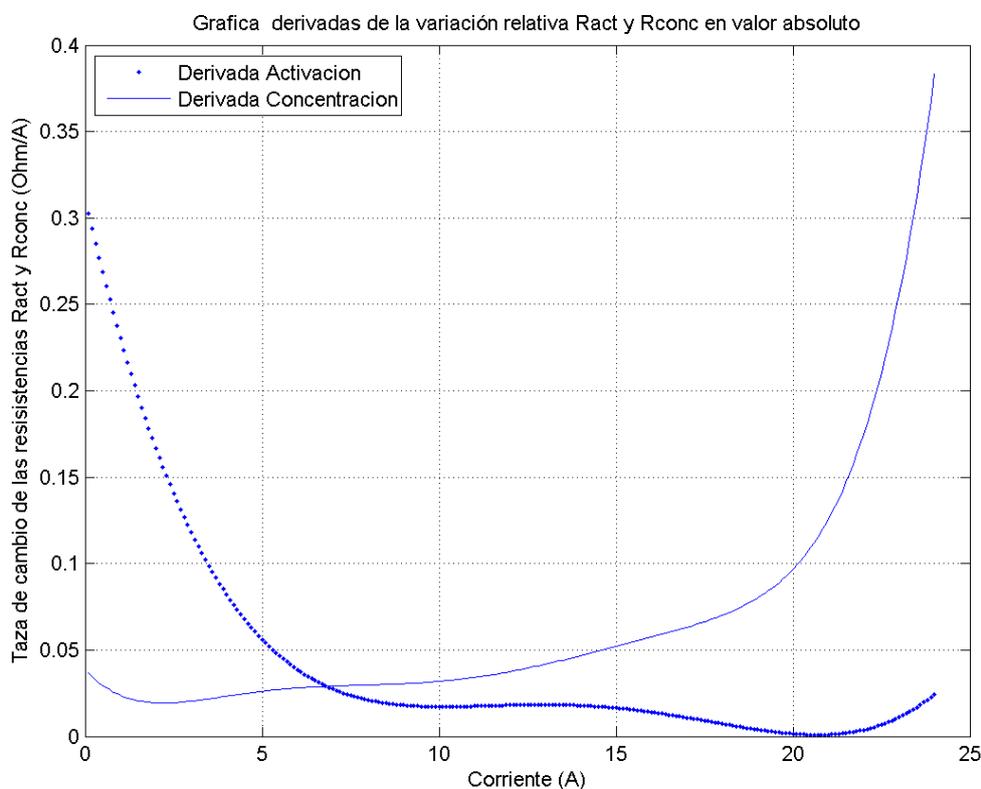


Figura 3.10: Tasa de variación de R_{act} y R_{conc} . Se observa que en la región de corrientes medias ambas derivadas se mantienen en valores casi constantes.

Resumiendo la importancia de la respuesta estática radica en que:

- La respuesta estática es la característica entrada (I_c) salida (E_{celda}) del sistema.
- En la respuesta estática se puede identificar la zona de trabajo E_{celda} e I_c en donde el sistema es linealizable.
- Se puede obtener la suma de R_{ohm} , R_{conc} y R_{act} como la pendiente en la zona lineal.

Procedimiento para obtener la respuesta estática

En el apartado 3.4.2 se muestra el conexionado de los equipos. A continuación se enumeran los pasos que se siguen para el relevamiento de la respuesta estática.

1. Estabilización.

El primer paso del procedimiento para relevar la curva estática consiste en “encender” la celda de combustible, dejando que esta se estabilice y alcance su voltaje de vacío, en un tiempo aproximado de 15 minutos. Para encender la celda se

debe alimentar con corriente la celda generadora, para que empiece a suministrar oxígeno e hidrógeno.

2. Adquisición.

Antes de excitar la celda se enciende el equipo de adquisición, programándolo para que adquiera por un tiempo de 30 minutos.

3. Excitar a la celda en pasos de corrientes de entre 10 y 50 mA.

Luego de que la salida de la celda se ha estabilizado se debe empezar a inyectar escalones de corrientes en saltos entre 10 y 50 mA, comenzando desde 0 hasta 750 mA. Se aguarda 2 minutos⁵ entre cada salto de corriente, con el fin de que se extingan los transitorios.

Datos esperados

Se muestra en la fig. 3.11 la respuesta estática relevada por el grupo de trabajo de Facultad de Ciencias correspondiente a la celda a estudio.

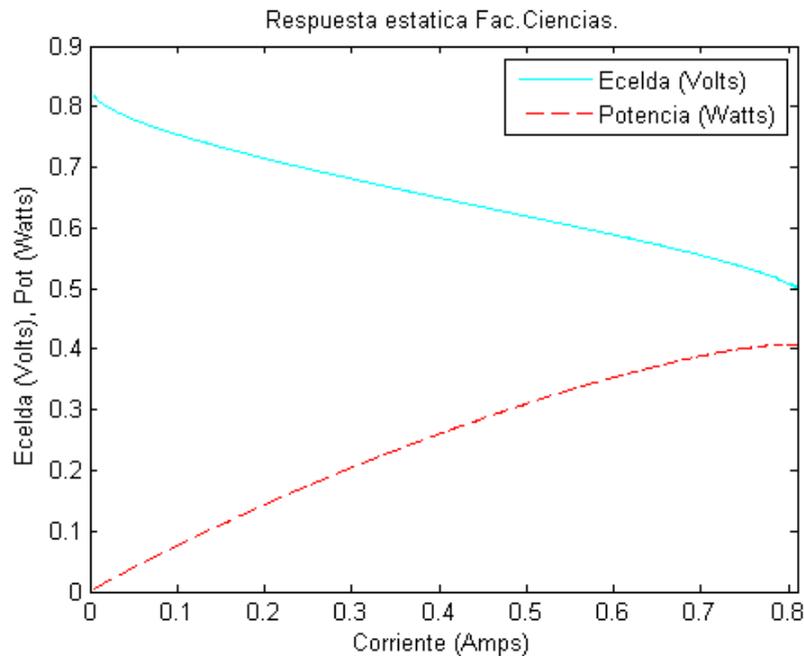


Figura 3.11: Curva estática relevada por el grupo de trabajo de Fac. Ciencias, también se aprecia la característica de Corriente-Potencia de la celda.

En la fig. 3.11 se aprecia la característica corriente-voltaje y la característica corriente-potencia, la cual también es de importancia. Se observa que; para bajas y altas corrientes la celda tiene un comportamiento no lineal, y que existe una zona (entre 150 mA y 700 mA) en la cual la curva estática tiene un comportamiento lineal. La zona entre 150

⁵La constante de tiempo del sistema, $\tau = 1/R_{ca}.C_{dc}$, es menor a 0.1 seg, esto se obtiene con los datos de 3.6.2. Por lo tanto la espera de 2 minutos es suficiente para garantizar la extinción de la respuesta transitoria en este ensayo.

mA y 700 mA será la zona de trabajo.

La curva de potencia da el criterio para elegir en que zona de trabajo es deseable operar a los efectos de maximizar la energía que entrega la celda. Por lo que se aprecia en la misma es deseable estar cerca de la zona de altas corrientes, porque de esta forma se maximiza la potencia entregada por la celda. Para no caer en la zona no lineal de altas corrientes se opta por trabajar en la zona de corrientes menores a 700 mA.

Los investigadores de Facultad de Ciencias obtuvieron esta respuesta estática utilizando un potencióstato. El potencióstato fija el voltaje de la celda (E_{celda}) y mide la corriente (I_c) entregada por la misma. Este último tiene la ventaja de ser un equipo programable permitiendo una adquisición automática con saltos de voltajes suaves con pendientes limitadas previamente programadas.

Esto marca diferencias con el actual procedimiento, ya que a diferencia del potencióstato, la F.C.C fija la corriente I_c en vez del voltaje E_{celda} . Existe el riesgo de obtener resultados distintos por el hecho de no contar con un sistema de medida automatizado como el potencióstato.

3.5.2. Respuesta escalón

Descripción de la respuesta escalón.

El ensayo de respuesta escalón consiste en excitar la celda con escalones de corriente menores a 100 mA de amplitud, adquiriendo la respuesta en voltaje (E_{celda}). Con este procedimiento es posible identificar los parámetros del modelo propuesto, como se detallará mas adelante.

A diferencia de la respuesta estática, en la que sólo se releva el valor de régimen frente a una excitación, ignorándose los transitorios, en los ensayos de escalón lo que importa es conocer la respuesta dinámica de la celda, estudiando la evolución de la misma hasta alcanzar el valor de equilibrio.

En la fig. 3.12 se describe el experimento. En la imagen *A* se repite el conexionado explicado en el apartado 3.4.2, pero aquí se agrega el modelo propuesto para la celda y se omite el amperímetro por sencillez, se recuerda que V_{cc} se impone con la fuente PS 220 y que V_b se impone con la fuente CFG 250. En la imagen *B* se muestra el equivalente de la circuitería, que reemplaza los elementos activos y pasivos por una fuente de corriente controlada como se explica en el apartado 3.4.2. En la imagen *C* se observa la celda con la fuente corriente. Finalmente en *D* vemos una gráfica de la corriente de excitación, en forma de escalón. El objetivo es imponer una corriente como la de la imagen *D* en el circuito de la imagen *B*.

Por lo mostrado en el apartado 3.5.1 las resistencias del modelo propuesto tienen un comportamiento lineal en un determinado rango de corrientes, por lo que solo se tomarán como válidos para la identificación del modelo los escalones en dicho rango.

Procedimiento respuesta escalón

1. Estabilización:

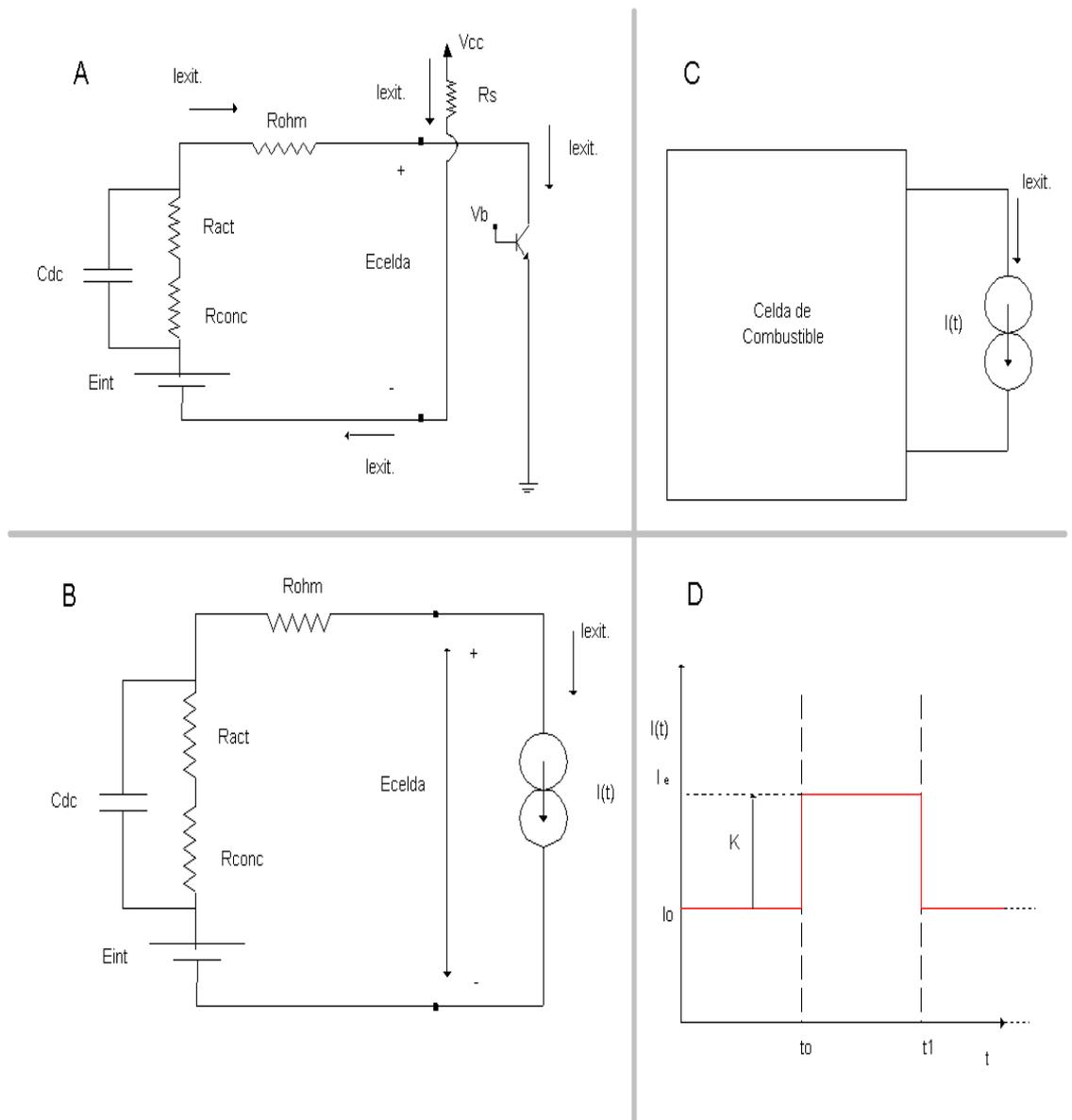


Figura 3.12: A) Conexión incluyendo el modelo de la celda, se omite el amperímetro, se ve la corriente de excitación I_{excit} . B) La circuitería opera como una fuente de corriente variable. C) La celda conectada a una fuente de corriente. D) Función de corriente I_{excit} en el experimento de la respuesta escalón.

El primer paso es idéntico al del ensayo anterior. Consiste en “encender” la celda de combustible, dejando que esta estabilice y alcance su voltaje de vacío, en un tiempo aproximado de 15 minutos.

2. Ajuste de escalón:

Por medio del Generador de Señal se ajusta la F.C.C. para obtener escalones de corriente de 100 mA sumado a un corriente de offset de 50 mA. La frecuencia de ocurrencia de escalones se elige de manera que la duración de los mismos garantice la eliminación de transitorios. De esta manera se toma un período entre 2 seg y 6 seg⁶.

3. Adquisición:

Luego de ajustada la corriente de excitación de la celda, se procede a la adquisición de datos en el nivel de corriente inicial que es de 50 mA.

4. Excitar la celda, incrementando el offset en pasos de 100 mA de corriente:

Después de adquirir en cierto nivel de corriente de offset, se procede a adquirir de igual manera al paso anterior, aumentando en 100 mA el offset de corriente, mediante las opciones de ajuste que brinda la fuente, conservando las características en el escalón descritas en el paso 2. Este proceso se repite de manera de adquirir respuestas al escalón en todas las corrientes de excitación hasta 750 mA, a intervalos de 100 mA.

Datos esperados

En la fig. 3.12 B) vemos el equivalente del circuito de la celda de combustible conectado a la fuente de corriente de excitación. Para una corriente escalón como la de la fig. 3.12 D) el voltaje E_{celda} responde a la siguiente ecuación:

$$E_{celda}(t) = E - (R_{ohm} + R_{ca}) \cdot I_e + e^{-(t-t_0)/R_{ca}C_{dc}} \cdot (I_e R_{ca} - v_{oc}) \quad (3.8)$$

en donde E es el voltaje de vacío de la celda, R_{ohm} es la resistencia óhmica, R_{ca} incluye la suma de las resistencias de activación y concentración, I_e es el valor final de la corriente de excitación, C_{dc} es el Condensador y v_{oc} es el voltaje inicial de carga del condensador en el instante de aplicar el escalón.

La ecuación 3.8 tiene algunas particularidades. Es de importancia tener en cuenta los valores iniciales y finales, o sea el voltaje en bornes de la celda al aplicar el escalón de corriente, ($E_{celda}(t = t_0)$) y el valor final que alcanza la función ($E_{celda}(t = \infty)$), antes de que actúe otro escalón. Se tiene que:

$$E_{celda}(t = 0) = E - v_{oc} - R_{ohm}I_e \quad (3.9)$$

$$E_{celda}(t = \infty) = E - (R_{ca} - R_{ohm})I_e \quad (3.10)$$

El valor de v_{oc} depende de la última excitación en corriente, si esta fue de un valor I_o y se encuentra en ese valor por un largo período de tiempo (si $I_e = I_o$ en $t = t_0^-$), entonces se tiene que:

$$v_{oc} = I_o \cdot R_{ca} \quad (3.11)$$

⁶Se recuerda que la constante de tiempo $\tau = 1/R_{ca} \cdot C_{dc}$, es menor a 0.1 seg.

Sustituyendo (3.11) en (3.10) se obtienen los valores de $E_{celda}(t = t_0)$ y $E_{celda}(t = \infty)$ en función de las corrientes y las resistencias:

$$E_{celda}(t = 0) = E - I_o \cdot R_{ca} - R_{ohm}(I_o + k) \quad (3.12)$$

$$E_{celda}(t = \infty) = E - (R_{ca} - R_{ohm})(I_o + k) \quad (3.13)$$

Donde k cumple que $I_e = I_o + k$. Estas características de la respuesta escalón se aprecian en la fig 3.13. En la misma se observa la gráfica de E_{celda} según la ecuación 3.8 y se indican las particularidades recién mencionadas debidos a las condiciones iniciales. Aquí se observa el salto instantáneo de $k \cdot R_{ohm}$ en t_0 y la evolución exponencial en la forma $e^{-(t-t_0)/R_{ca} \cdot C_{dc}}$ hasta el reposo.

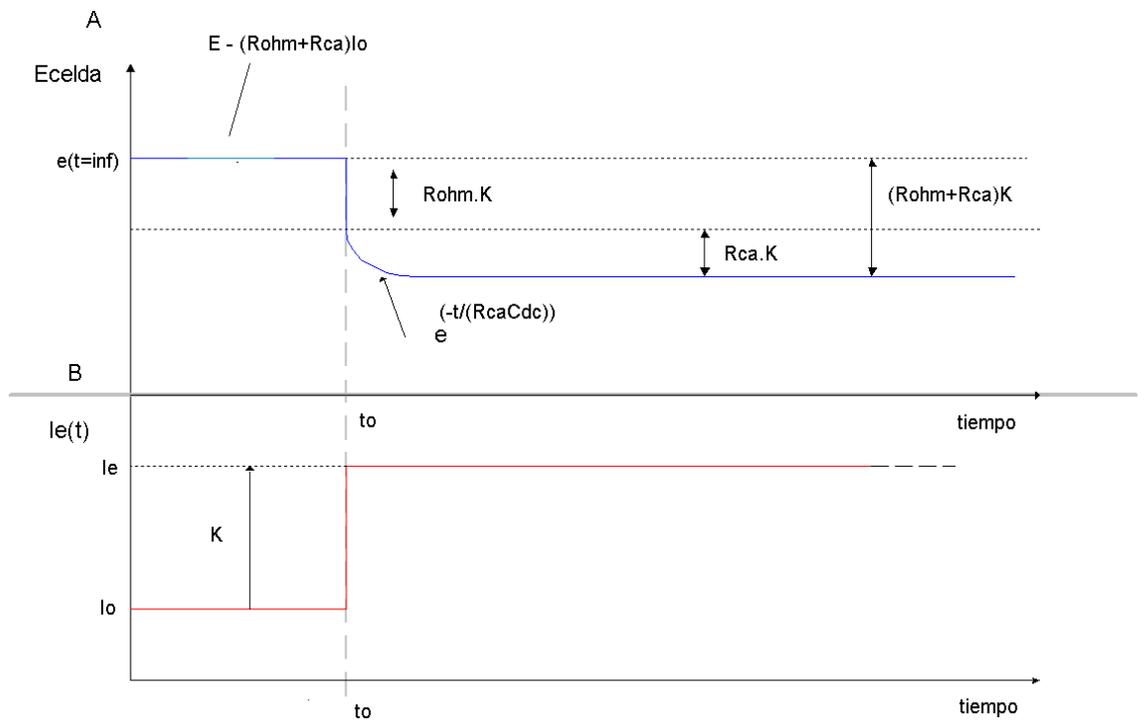


Figura 3.13: A) Respuesta esperada de E_{celda} para una entrada escalón. B) Señal de corriente que excita la celda en este ensayo.

Conociendo la respuesta esperada por el sistema y luego de adquirir los datos experimentales se obtienen los parámetros de (3.8) por medio de ajuste de mínimos cuadrados, esto se detalla en el apartado 3.6.

3.5.3. Ensayo respuesta en frecuencia

Descripción de la respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia consiste en excitar la celda con corrientes sinusoidales de diferentes frecuencias y adquirir la forma de onda de la tensión. En la fig. 3.14

se muestran las corrientes de excitación $I(t)$ y la señal de respuesta $E_{celda}(t)$, a ser adquirida. Como señales de excitación se utiliza una corriente de valor medio 600mA, valor cercano al punto de máxima potencia de la celda y dentro de la zona óhmica, sumado a sinusoidales de amplitud 50mA, de frecuencias entre 0,1Hz y 200Hz.

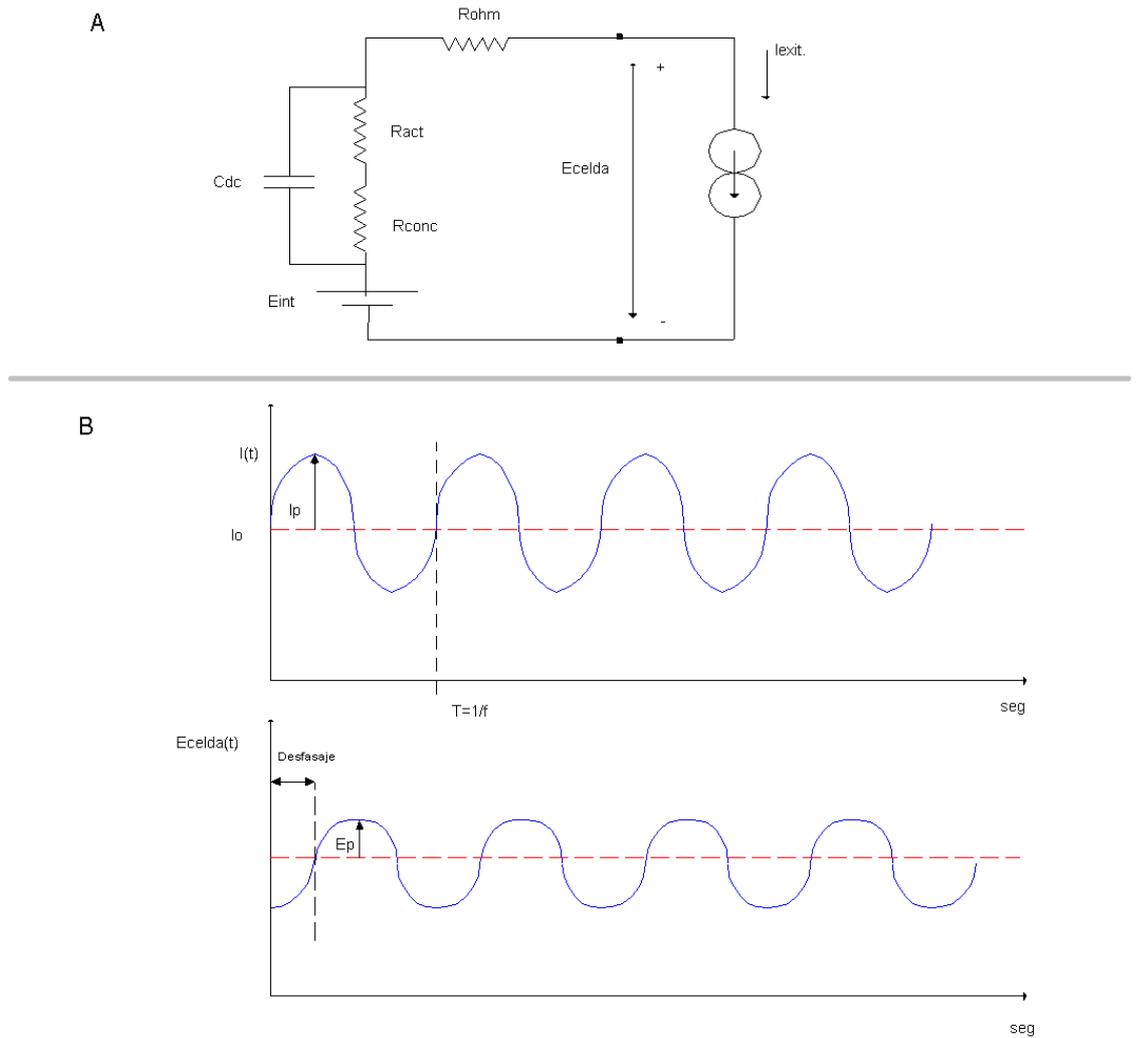


Figura 3.14: Descripción del ensayo de respuesta en frecuencia, en A se observa nuevamente el conexionado, en B se muestran la corrientes de excitación $I(t)$ y la respuesta de la celda $E_{celda}(t)$.

Luego para cada frecuencia se obtiene un valor de ganancia (v_{out}/i_{out}) y de desfasaje, de manera de poder obtener un modelo de respuesta en frecuencia, a partir del cual se obtienen los parámetros del modelo propuesto para la celda, como se explica más adelante.

Procedimiento

1. Estabilización:
El primer paso es idéntico a los de los ensayos anteriores. Consiste en “encender” la CdeC, dejando que esta estabilice y alcance su voltaje de vacío, en un tiempo aproximado de 15 minutos.
2. Ajuste de la corriente:
Por medio del Generador de Señales se ajusta la F.C.C. con un valor de offset de la corriente (I_{dc}) a un valor cercano a 600mA, y con una amplitud sinusoidal (i_{ac}) de en 50mA.
3. Adquisición:
Una vez ajustada la F.C.C. se procede a la adquisición. Para ello se varía la frecuencia de la senoide de 0,1Hz a 200Hz, adquiriendo para cada una de ellas la tensión (V_{out}) y la corriente (I_{out}). En todos los casos se reguló la adquisición para tener una frecuencia de muestreo y un tiempo de captura adecuados. Cabe señalar que para frecuencias mayores de 200Hz la captura no fue posible ya que el adquisidor no alcanza frecuencias de muestreo adecuadas para el posterior estudio de la señal.

Datos Esperados

Considerando el modelo propuesto en la fig. 3.1, y aplicando el modelo de pequeña señal, se obtiene que:

$$v_c = \left[\frac{R_{ca}}{1 + R_{ca} \cdot j\omega C} + R_{ohm} \right] \cdot i_c \quad (3.14)$$

donde i_o y v_o son los valores de corriente y tensión en pequeña señal.

Desarrollando la expresión anterior:

$$\frac{v_c}{i_c}(j\omega) = \frac{R_{ohm}R_{ca}j\omega C + (R_{ohm} + R_{ca})}{1 + R_{ca}j\omega C} \quad (3.15)$$

$$\frac{v_c}{i_c}(j\omega) = R_{ohm} \cdot \frac{j\omega + \frac{R_{ca} + R_{ohm}}{R_{ca}R_{ohm}C}}{j\omega + \frac{1}{R_{ca}C}} \quad (3.16)$$

De aquí se deduce que la respuesta en frecuencia tiene la siguiente forma:

$$\frac{v_c}{i_c}(j\omega) = G \cdot \frac{j\omega + z}{j\omega + p} \quad (3.17)$$

donde $G = R_{ohm}$, $z = \frac{R_{ohm} + R_{ca}}{R_{ca}R_{ohm}C}$ y $p = \frac{1}{R_{ca}C}$.

De lo anterior se puede despejar R_{ohm} , R_{ca} y C :

$$\begin{aligned} R_{ohm} &= G \\ R_{ca} &= G \frac{(z-p)}{p} \\ C &= \frac{1}{G(z-p)} \end{aligned}$$

De esta manera se obtiene el modelo esperado de la respuesta en frecuencia de la celda, a partir de la cual se puede obtener los parámetros del modelo propuesto. Cabe realizar algunas observaciones:

1. El modelo de la fig. 3.1 es válido si y solo si $z > p$, de lo contrario R_{ca} y C serían negativos, lo cual es absurdo.
2. Para bajas frecuencias, el valor de la ganancia $\frac{v_c}{i_c}(j\omega)|_{\omega=0}$ es igual a $R_{ohm} + R_{ca}$.
3. Análogamente para altas frecuencias, el valor de la ganancia $\frac{v_c}{i_c}(j\omega)|_{\omega=\infty}$ es igual a R_{ohm} .

A continuación se muestra en la fig. 3.15 el diagrama de Bode esperado de la respuesta en frecuencia:

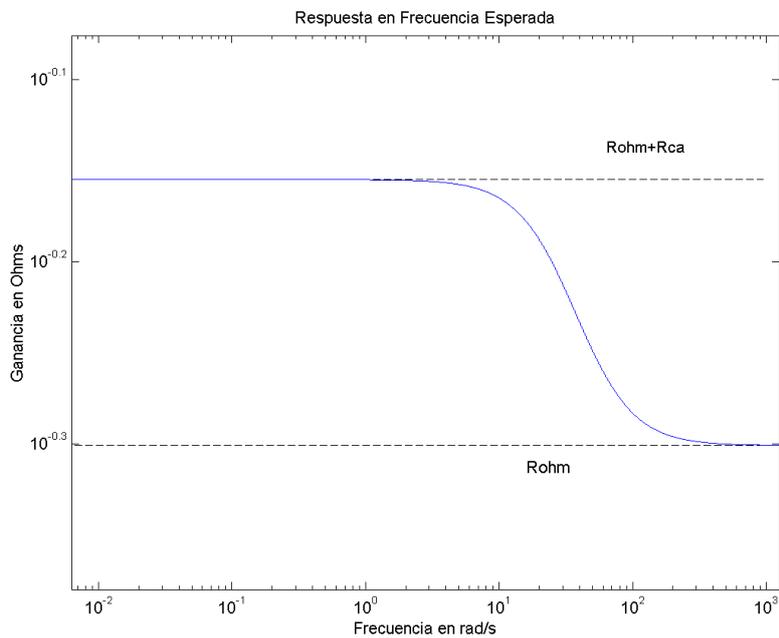


Figura 3.15: Ejemplo de Diagrama de Bode esperado.

3.5.4. Ensayo respuesta triangular

Fundamentos del ensayo

Uno de los objetivos del proyecto es el estudio de las CdeC interactuando en los sistemas de generación distribuida, en los cuales existirá una interface DC-DC entre la celda y el sistema de distribución. Las interfaces DC-DC generan corrientes del tipo triangular. Esta es la razón por la cual es importante conocer cómo se comporta la celda cargada con este tipo de corrientes.

En este ensayo se analiza la respuesta de la celda a distintos tipos de ondas triangulares.

Procedimiento Repuesta Triangular

1. Estabilización:

El primer paso es idéntico a los ensayos anteriores. Se “enciende” la CdeC, dejando que esta estabilice y alcance su voltaje de vacío, en un tiempo aproximado de 15 minutos.

2. Ajuste de onda triangular:

Por medio del Generador de Señal se ajusta la F.C.C para generar una corriente de offset, en la zona óhmica, en 600 mA, de manera de operar en la zona de máxima potencia posible. Sumado a este offset se inyecta una onda triangular de corriente.

3. Adquisición:

Luego de ajustada la corriente de excitación de la celda se procede a la adquisición de los datos.

Datos esperados

En la fig. 3.16 se observa; en la imagen A la respuesta esperada por la celda a la corriente de excitación triangular, y en la imagen B se muestra esta corriente de excitación. La respuesta a la excitación triangular responde a la siguiente ecuación:

$$E_{celda}(t) = E - \frac{I_p R_{ohm}}{T} \cdot (t - t_0) - \frac{I_p R_{ca}}{T} \cdot (t - t_0) + e^{-(t-t_0)/R_{ca}C_{dc}} \cdot \left(\frac{I_p R_{ca}^2 C_{dc}}{T} + v_{oc} \right) \quad (3.18)$$

donde E , R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} junto con v_{oc} son los parámetros del modelo propuesto. El valor de pico de la corriente de excitación I_p , junto con el medio de período T , determinan la corriente de excitación como se muestra en la imagen B.

A partir de (3.18) se deduce que la respuesta triangular es una señal de la misma forma de onda que la excitación pero superpuesta con una función de forma exponencial (término $e^{-(t-t_0)/R_{ca}C_{dc}}$), que denota el efecto de carga y descarga del condensador. Cabe destacar que se supone en estas gráficas que $T > 4/(R_{ca}C_{dc})$ (para ver la extinción del término exponencial), con el fin de mostrar el efecto de carga y descarga junto con la respuesta en forma de rampa.

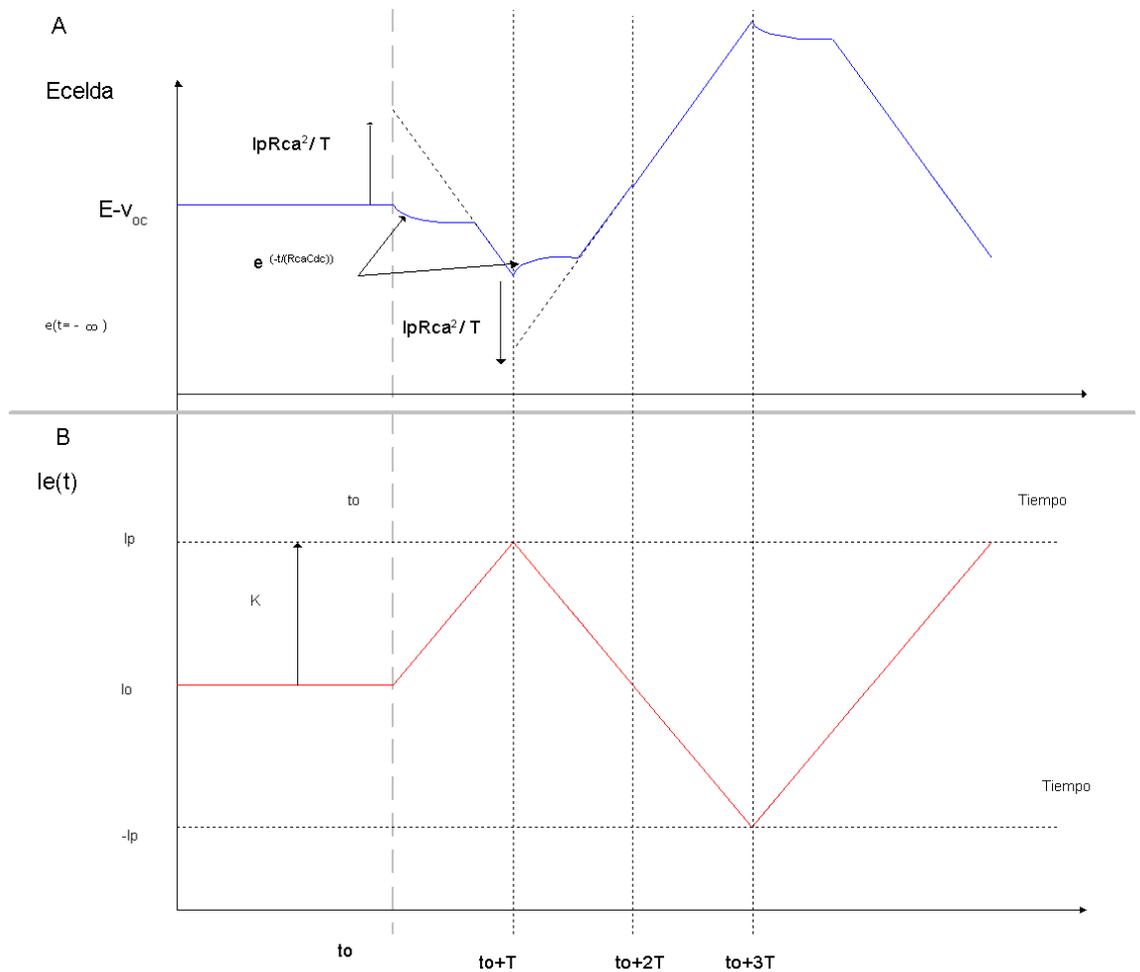


Figura 3.16: A) Respuesta esperada de E_{celda} para una entrada triangular. B) Señal de corriente que carga a la celda en este ensayo.

3.6. Análisis de datos

3.6.1. Datos obtenidos en el ensayo respuesta estática

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en el experimento de respuesta estática, el cual se explica en el apartado 3.5.1.

Presentación de los datos obtenidos

En la fig. 3.6.1 vemos las señales adquiridas. En la misma se observa I_c , junto con E_{celda} .

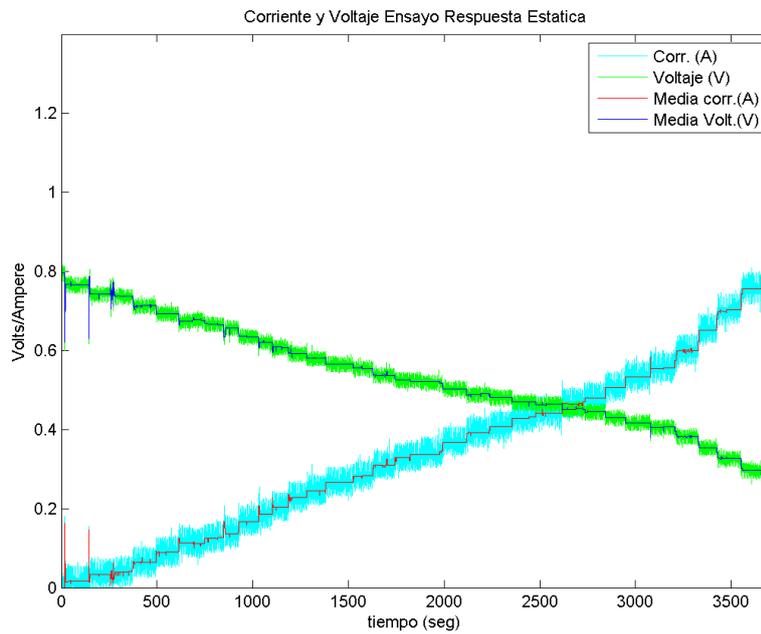


Figura 3.17: Señales obtenidas en el experimento de la respuesta estática.

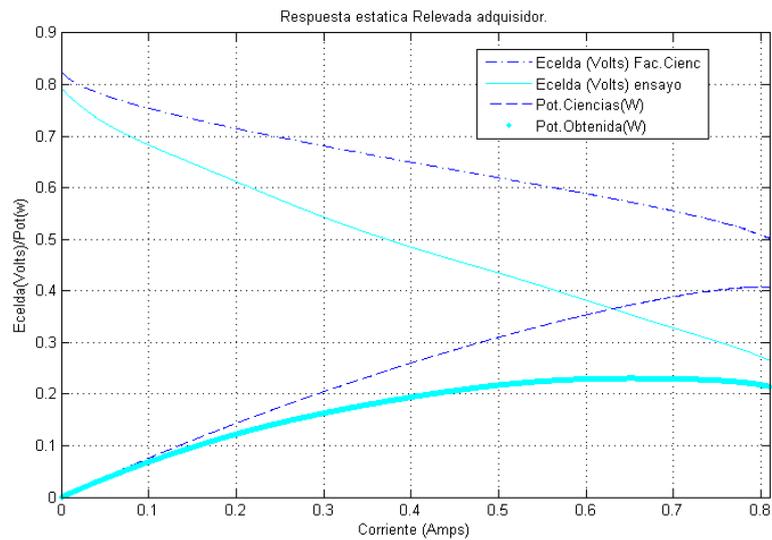


Figura 3.18: Comparación respuesta estática Fac. Ciencias y respuesta estática obtenida junto con sus respectivas curvas de potencia.

Los datos mostrados en la fig. 3.6.1 que aparecen en función del tiempo, resultan en la respuesta estática de la fig. 3.17. En esta figura se observa; la respuesta estática del grupo de trabajo Facultad de Ciencias, la respuesta estática obtenida en el ensayo,

junto con las respectivas curvas de potencia de ambos experimentos.

Por lo explicado en el apartado 3.5.1 se espera que la derivada de la respuesta estática tenga un valor constante en la zona lineal de corrientes. En la fig. 3.19 se deriva la respuesta estáticas de la fig. 3.17.

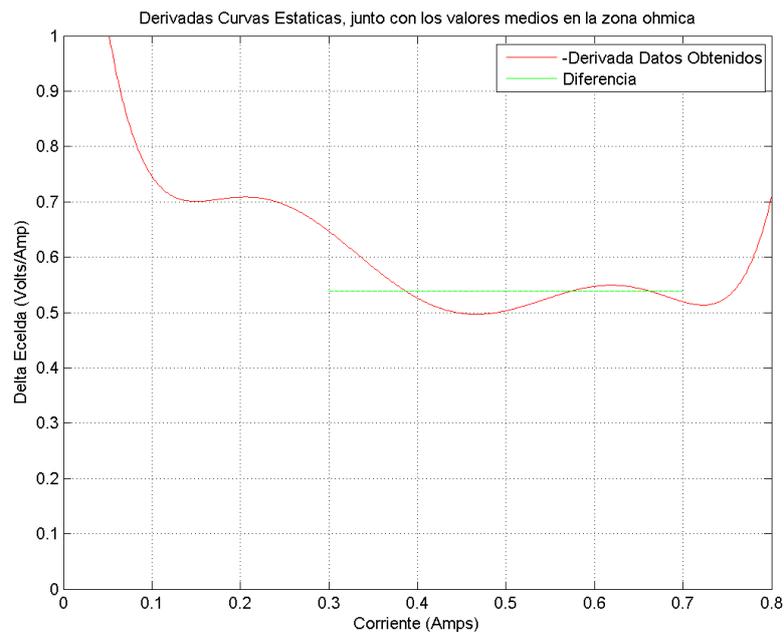


Figura 3.19: Derivadas de las respuestas estáticas.

Análisis de los datos obtenidos

La respuesta estática de la fig. 3.17, muestra la forma esperada. Cabe destacar que en dicha figura no se muestran los datos correspondientes a corrientes mayores a 800 mA, dado que la zona de interés es la de corrientes menores a 800 mA.

Se observa que:

- El voltaje de vacío de la celda es menor al medido por el grupo de Facultad de Ciencias.
- Una desviación con respecto a la curva estática de Facultad de Ciencias la cual se hace más pronunciada hacia la zona de altas corrientes.

Estas desviaciones están dadas por los aspectos del armado del kit y el estado de la membrana PEM. Pese a que ambas respuestas muestran voltajes de vacío y en carga distintos, los comportamientos de estas curvas conservan sus principales características, es decir, las regiones de activación, óhmica y de concentración.

En la fig. 3.19 al observar la derivada de la curva estática adquirida vemos que en la zona óhmica (350 mA y 700 mA) la pendiente de la respuesta estática se mantiene en un valor medio de $0,55\Omega$, con una diferencia máxima de este valor del 10%. Este es valor de la resistencia $R_{ca} + R_{ohm}$, que incluye la suma de las pérdidas óhmicas y las pérdidas de activación y concentración. Por lo tanto se tiene que R_t es la resistencia total:

$$R_t = R_{ca} + R_{ohm} \quad (3.19)$$

Y su valor es: $R_t = 0,55\Omega$

3.6.2. Datos obtenidos ensayo respuesta escalón

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos en el experimento de respuesta escalón, cuyos fundamentos se explican en el apartado 3.5.2.

Presentación de los datos obtenidos

En la fig. 3.6.2 se muestra una de las adquisiciones obtenidas durante el experimento. Aquí se observa la respuesta de la celda a una serie de escalones, con una corriente de 50 mA de pico sobre un nivel de continua de 250 mA. Esta señal produce escalones de subida y bajada, los cuales se usan para realizar el ajuste que identifica los parámetros del modelo con ese nivel de corriente. En la fig. 3.20 vemos uno de los escalones de subida obtenidos, denominado así por la subida en voltaje, aunque el escalón de entrada sea bajante, en estas señales se ajustarán los parámetros R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} .

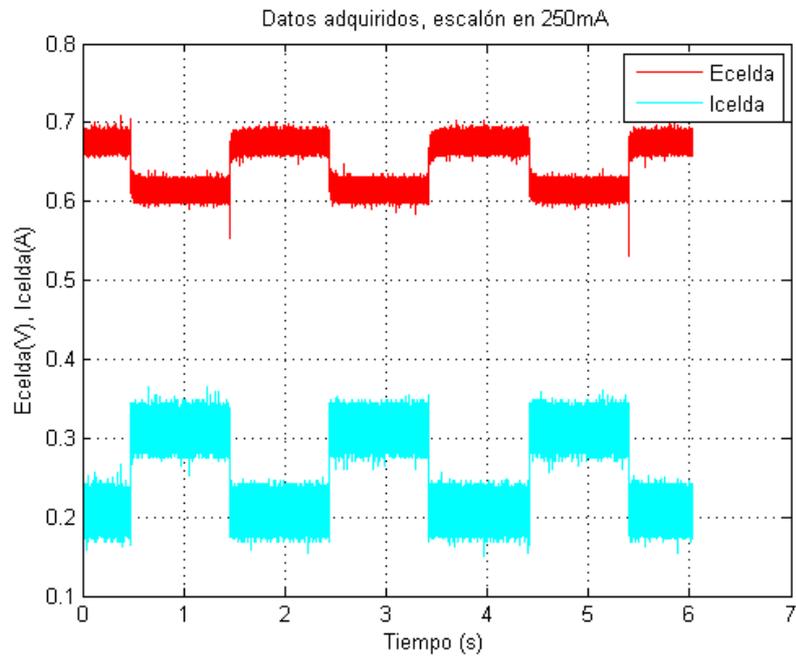


Figura 3.20: Uno de los ensayos de la respuesta escalón, se observa la evolución de E_{celda} con la corriente.

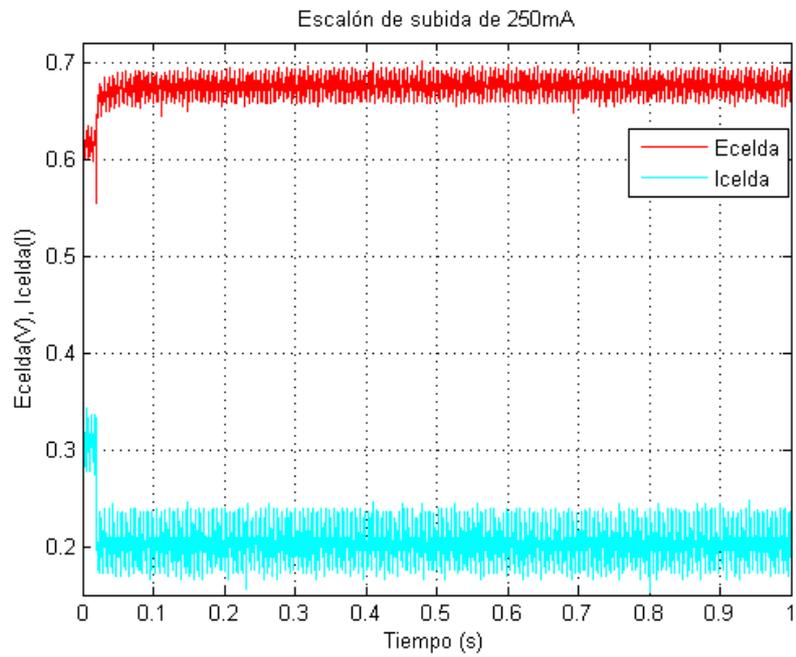


Figura 3.21: Uno de los escalones obtenidos de las señales mostradas en la fig. 3.6.2.

A partir de las ecuaciones (3.8), (3.12) y (3.13) expuestas en el apartado 3.5.2, se elaboró un software en Matlab el cual ajusta los parámetros de (3.8) a cada uno de los escalones obtenidos en los diferentes niveles, hasta 800 mA. En las figs 3.22 a 3.25 vemos el ajuste de algunos de los diferentes escalones de corrientes en la zona óhmica.

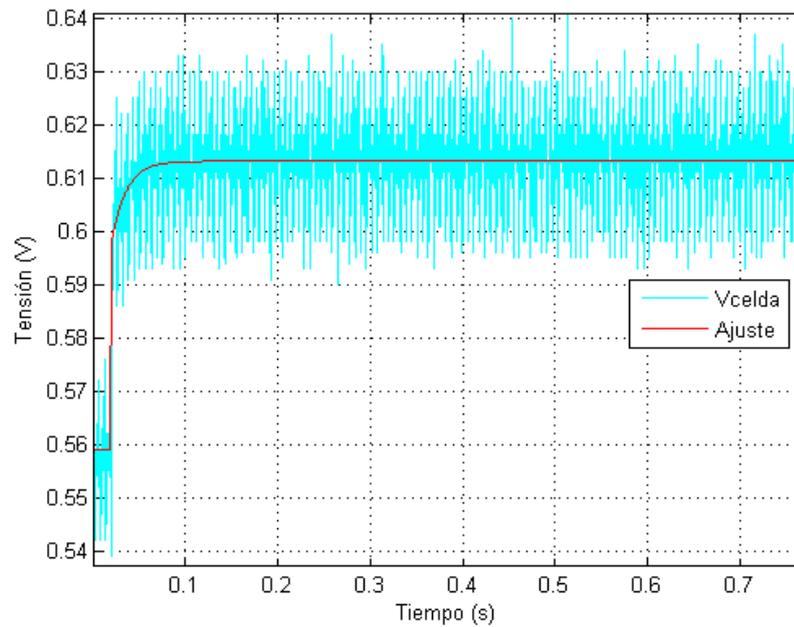


Figura 3.22: Ajuste escalón de subida de 350 mA.

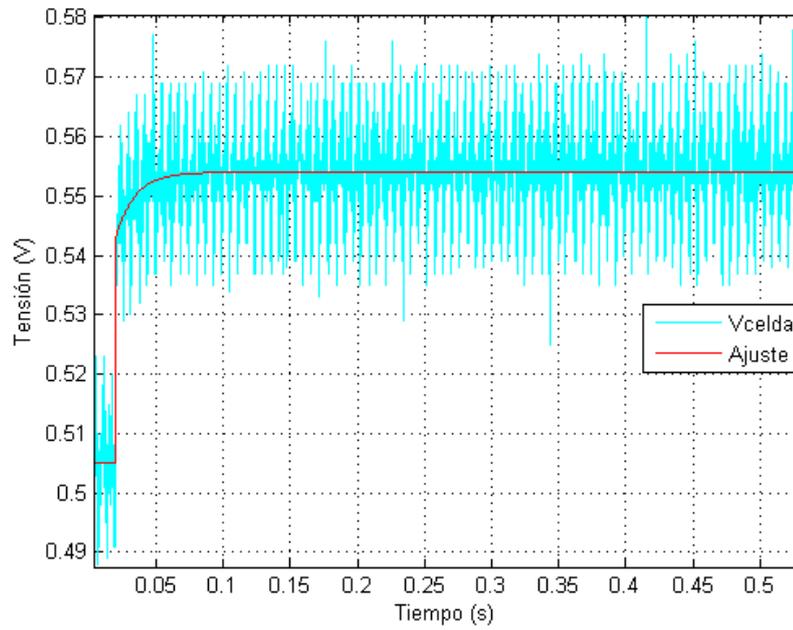


Figura 3.23: Ajuste escalón de subida de 450 mA.

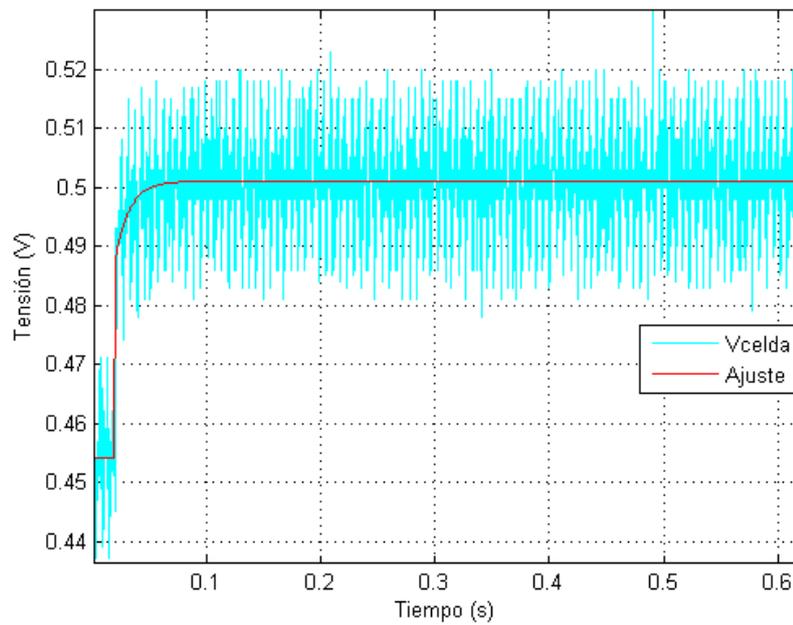


Figura 3.24: Ajuste escalón de subida de 550 mA.

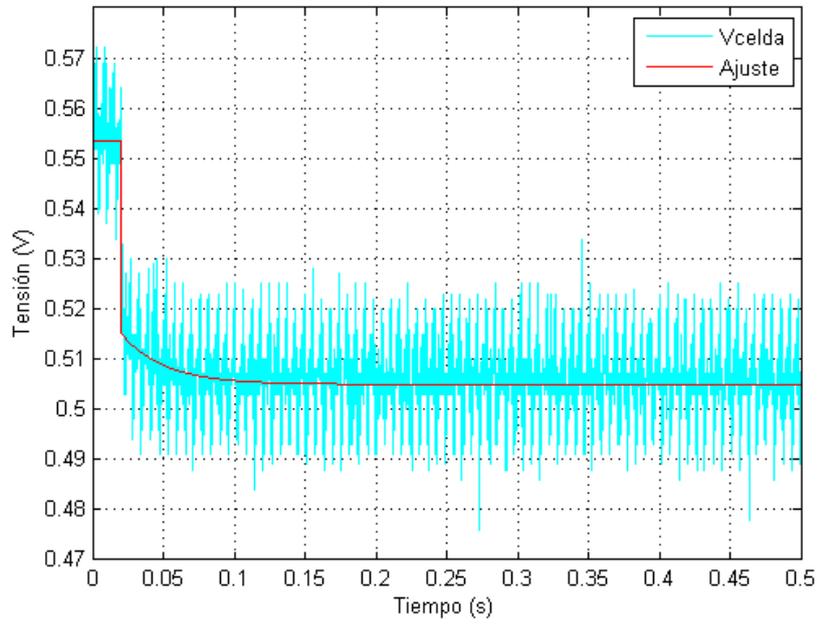


Figura 3.25: Ajuste escalón de bajada de 450 mA.

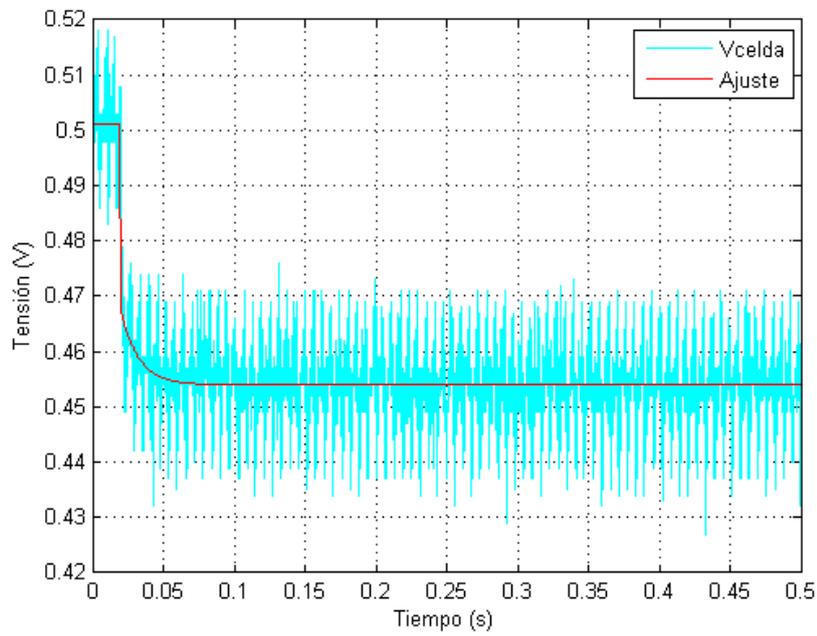


Figura 3.26: Ajuste escalón de bajada de 550 mA.

Nivel DC(mA)	$R_{ohm}(\Omega)$	$R_{ca}(\Omega)$	$C_{dc}(F)$	Notas
50	0,64	0,65	0,38	Fuera del promedio
150	0,47	0,18	0,18	
150	0,47	0,18	0,20	
150	0,43	0,22	0,15	
250	0,45	0,13	0,23	
250	0,46	0,12	0,25	
350	0,48	0,09	0,42	
350	0,42	0,13	0,12	
350	0,44	0,10	0,14	
450	0,39	0,16	0,10	
450	0,50	0,05	0,30	
550	0,47	0,55	0,23	
550	0,49	0,03	0,39	
650	0,47	0,07	0,91	Descartado
750	0,48	0,06	1,11	Descartado
750	0,48	0,05	0,32	

Cuadro 3.1: Relevamiento de respuesta escalón. Escalones de subida.

Nivel DC(mA)	$R_{ohm}(\Omega)$	$R_{ca}(\Omega)$	$C_{dc}(F)$	Notas
50	0,38	0,89	0,08	Fuera del promedio
50	0,36	0,89	0,07	Fuera del promedio
50	0,36	0,89	0,07	Fuera del promedio
150	0,48	0,17	0,14	
150	0,54	0,13	0,18	
250	0,51	0,06	0,27	
250	0,53	0,40	0,45	
250	0,50	0,08	0,21	
350	0,42	0,15	0,11	
350	0,48	0,07	0,23	
350	0,53	0,03	0,29	
450	0,46	0,09	0,35	
450	0,47	0,06	0,25	
450	0,26	0,26	0,05	
550	0,33	0,19	0,07	
550	0,31	0,23	0,07	
550	0,48	0,06	0,45	
650	0,49	0,05	1,32	Descartado
750	0,45	0,06	0,18	
750	0,48	0,04	1,52	Descartado
750	0,48	0,04	1,52	Descartado

Cuadro 3.2: Relevamiento de respuesta escalón. Escalones de bajada.

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los valores de R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} obtenidos a partir los ajustes para escalones de subida y para escalones de bajada respectivamente.

Análisis de los Datos Obtenidos

Se observa en las figs. 3.22 a 3.25 un correcto ajuste de los modelos. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los valores de los parámetros de cada ajuste, tomando los valores de corriente correspondientes a la zona óhmica obtenemos valores de R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} coherentes entre sí, tanto en la excitación de escalones positivos (subida) como negativos (bajada), con la excepción de los resultados indicados como “Descartado”. En estos casos puntuales el algoritmo no consigue ajustar con éxito, por lo que no son tomados en cuenta.

Se muestra en el cuadro 3.3 el promedio de los datos presentados en los cuadros 3.1 y 3.2. No son considerados en este promedio los valores correspondientes a corrientes de DC por debajo de 150 mA, dado que en estas entradas están fuera de la región óhmica. Esto se ve en los cuadros 3.1 y 3.2 donde se denotan fuertes pérdidas de activación para estas corrientes.

	$R_{ohm}(\Omega)$	$R_{ca}(\Omega)$	$C_{dc}(F)$
Promedio esc subida	0.46	0.15	0.23
Promedio esc bajada	0.45	0.14	0.22
Desviación	1.6 %	11.5 %	6.1 %

Cuadro 3.3: Promedio de los valores relevados.

Para contrastar los resultados con los obtenidos en el experimento de respuesta estática, se utiliza la ecuación (3.19) que define la resistencia total R_t , obteniéndose los resultados del cuadro 3.4. Aquí se muestra que la desviación entre los resultados de ambos ensayos fue menor al 5.1 % en el caso de escalones de bajada y menor al 8.3 % en el caso de escalones de subida.

Resistencia Total	Valor (Ω)	desviación
$R_{testatica}$	0,56	0 %
$R_{tescalonsubida}$	0,61	8.3 %
$R_{tescalonbajada}$	0,59	5.1 %

Cuadro 3.4: Comparación de resultados entre la respuesta estática y la respuesta escalón.

Se considera que en ambos experimentos se obtienen resultados coherentes.

3.6.3. Datos obtenidos ensayo respuesta frecuencia

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en el experimento de respuesta en frecuencia, cuyos fundamentos se explican en el apartado 3.5.3.

Presentación de los datos obtenidos

En las figs. 3.27, 3.28 y 3.29, se observan algunas de las señales obtenidas en el experimento de respuesta en frecuencia. En las mismas se observa la respuesta de la celda a una serie de excitaciones sinusoidales de diferentes frecuencias, con corrientes de valor medio 600mA, y amplitud 50mA.

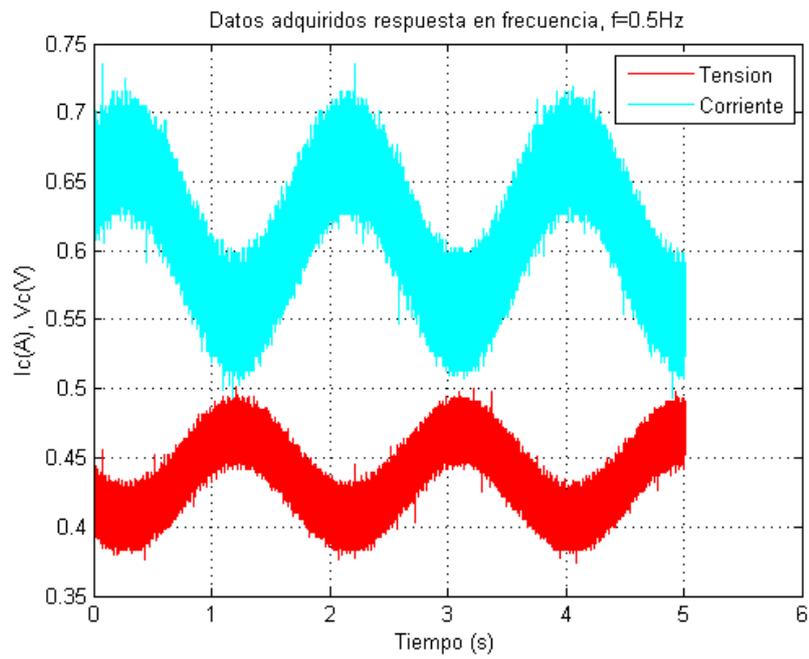


Figura 3.27: Datos adquiridos de frecuencia 0.5Hz.

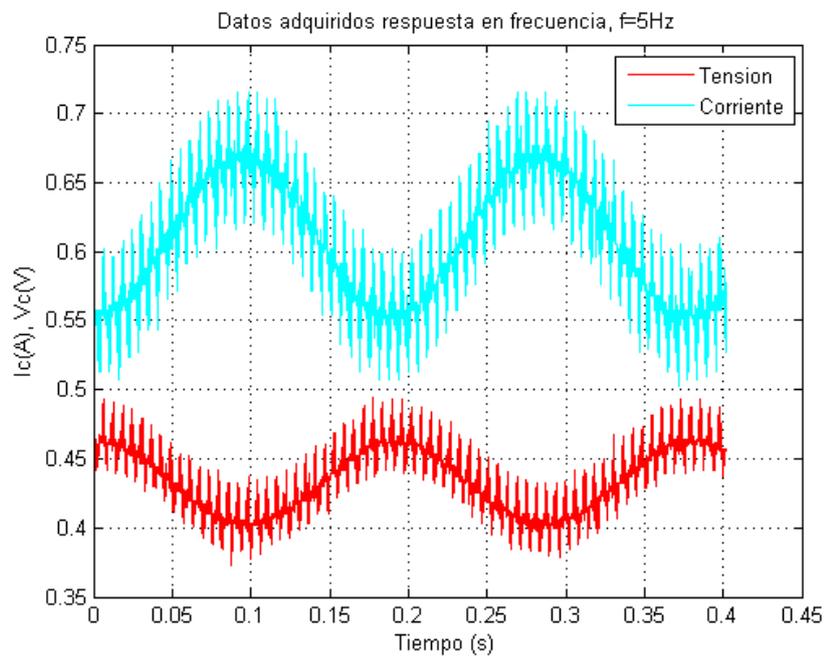


Figura 3.28: Datos adquiridos de frecuencia 5Hz.

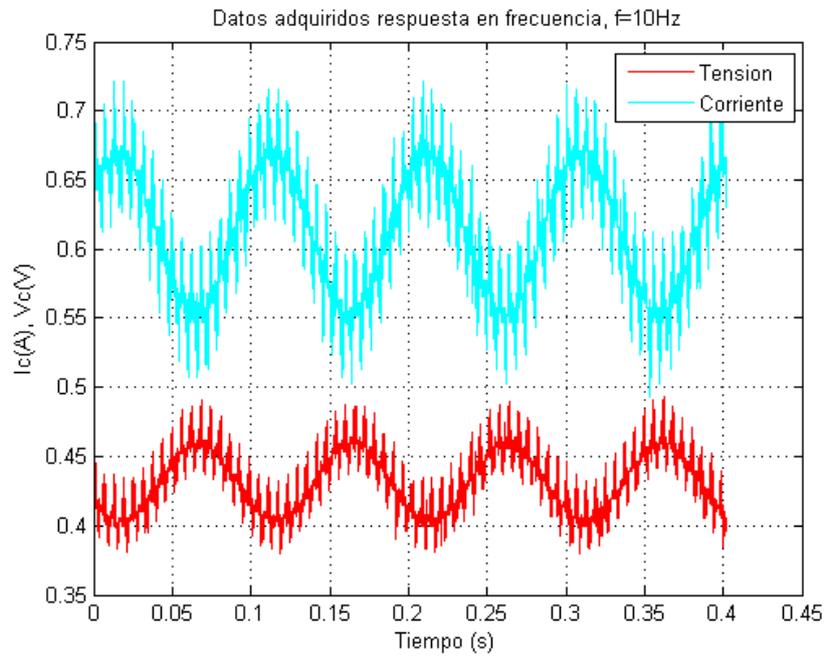


Figura 3.29: Datos adquiridos de frecuencia 10Hz.

Debido a los altos niveles de ruido introducidos durante la adquisición, se procede al filtrado de las señales. Dado que se trata de señales sinusoidales, los filtros lineales afectan con la misma ganancia y desfase, tanto a la corriente como a la tensión. De esta manera, si $F(j\omega)$ es la respuesta en frecuencia del filtro:

$$H(j\omega) = \frac{v_c(j\omega)}{i_c(j\omega)} = \frac{F(j\omega)v_c(j\omega)}{F(j\omega)i_c(j\omega)} = \frac{v_{fil}(j\omega)}{i_{fil}(j\omega)} \quad (3.20)$$

Entonces de (3.20) se deduce que estudiando las señales filtradas se obtiene la misma respuesta en frecuencia.

En las figs. 3.30 y 3.31 se muestran algunos ajustes realizados.

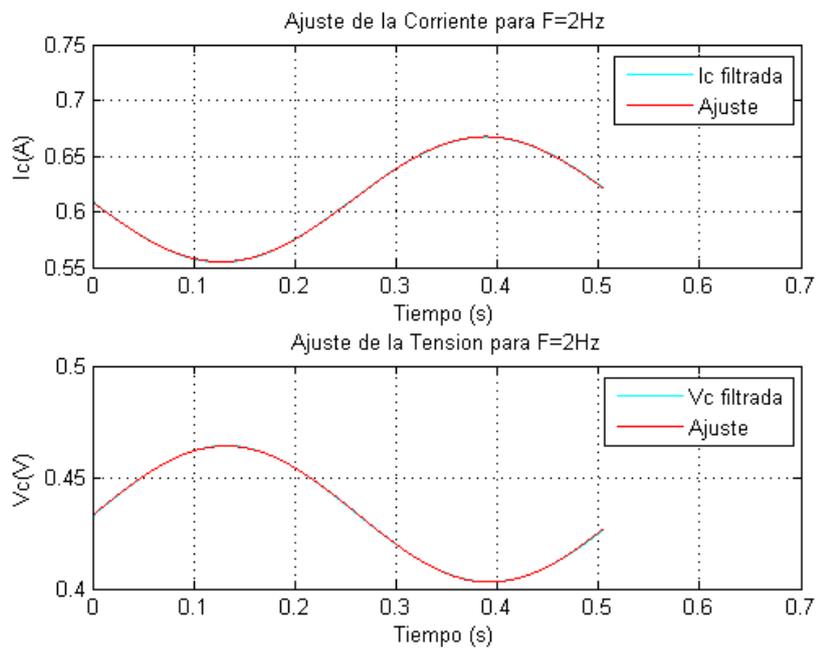


Figura 3.30: Ajuste de señal de frecuencia 2Hz.

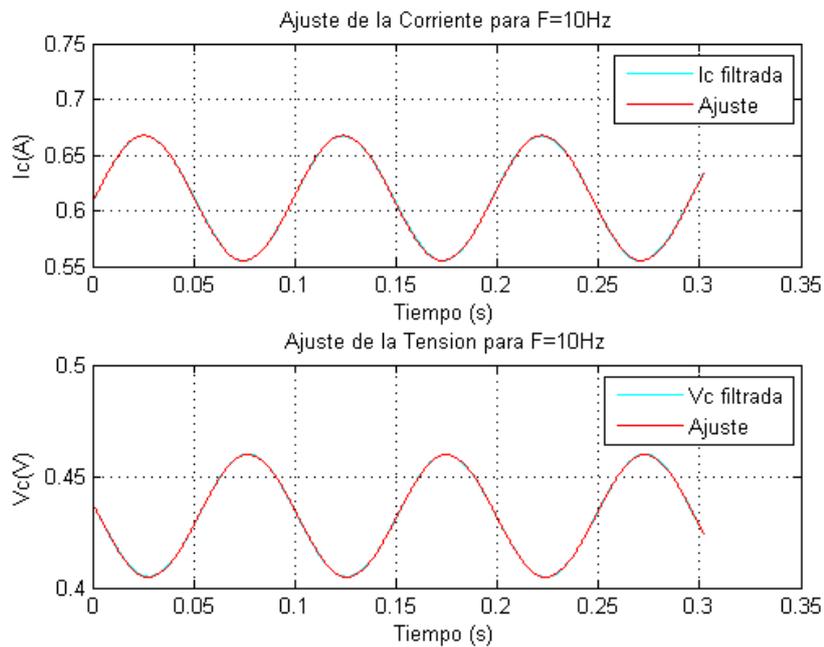


Figura 3.31: Ajuste de señal de frecuencia 10Hz.

Una vez ajustadas todas las adquisiciones como se muestra en la fig. 3.32 se grafi-

can los resultados obtenidos:

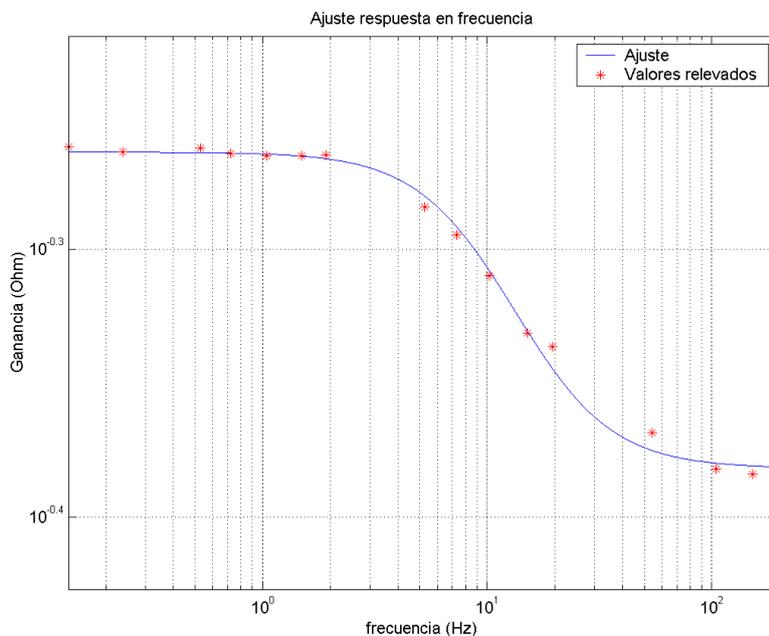


Figura 3.32: Ajuste de los datos obtenidos de la respuesta en frecuencia.

Los valores de respuesta en frecuencia obtenidos se ajustaron de acuerdo a la transferencia calculada en (3.17).

Análisis de los datos obtenidos

Una vez obtenida la respuesta en frecuencia se procede de la manera descrita en el apartado 3.5.3. Los parámetros de la respuesta en frecuencia se muestran en el cuadro 3.5.

$G(\Omega)$	$polo(Hz)$	$cero(Hz)$
0.42	5.76	7.56

Cuadro 3.5: Parámetros de la respuesta en frecuencia.

En el cuadro 3.6 se muestran los parámetros de la celda calculados a partir de la respuesta en frecuencia.

$R_{Ohm}(\Omega)$	$R_{ca}(\Omega)$	$C_{dc}(F)$
0.42	0.13	0.21

Cuadro 3.6: Parámetros del modelo de la celda.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el ensayo de respuesta escalón, ya que en todos los casos el error es menor al 8 %.

3.6.4. Datos obtenidos ensayo respuesta triangular

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en el experimento de respuesta triangular, cuyos fundamentos se explican en el apartado 3.5.4.

Presentación de los datos obtenidos

En las figs. 3.33 y 3.34 se presentan las señales adquiridas a 1 hz y a 10 hz. En ambas imágenes se muestra la corriente de excitación de la celda cuya forma de onda es la función diente de sierra. También se muestra la señal de la respuesta de la celda junto con la gráfica de la respuesta esperada, calculada en (3.18), en donde se sustituye R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} por los valores promedios obtenidos en el apartado 3.6.2, ver cuadro 3.3.

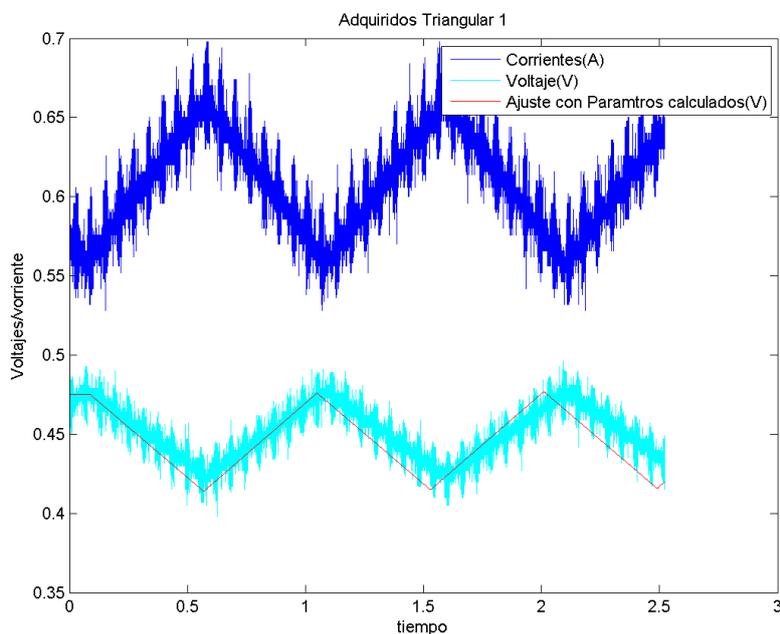


Figura 3.33: Señales ensayo de respuesta triangular 1 hz. Se observa la corriente de excitación y la respuesta de la celda junto con el ajuste usando los parámetros del modelo calculados en el apartado 3.6.2.

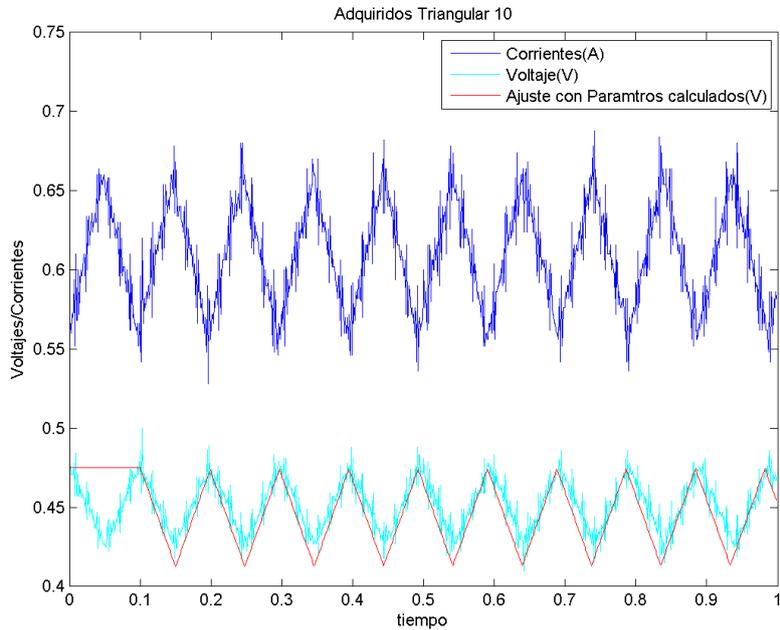


Figura 3.34: Señales ensayo de respuesta triangular 10 hz. Se observa la corriente de excitación y la respuesta de la celda junto con el ajuste usando los parámetros del modelo calculados en el apartado 3.6.2.

Análisis de los datos obtenidos

Se observa que las respuestas esperadas calculadas a partir de (3.18) con los datos asignados a R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} a partir del los promedios del cuadro 3.3 se ajustan a las señales adquiridas correctamente.

Cabe destacar que la señal de excitación de la celda muestra ciertas inestabilidades, como ser distintas alturas de pico máxima y una desviación en la duración del período en cada ciclo. Esto repercute en la señal de respuesta de la celda dando así ciertas irregularidades en la forma de onda. En cambio la gráfica de ajuste es una señal perfecta calculada en (3.18) asignándole los valores de R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} . Por lo cual es aceptable ciertas desviaciones entre la respuesta esperada y la respuesta adquirida que se observan en mayor grado en los valores de pico de estas respuestas, zona de mayor inestabilidad de la señal excitante.

3.7. Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones a las que se llegó después de realizar la experiencia. Principalmente estas se centran en el comportamiento del modelo propuesto.

3.7.1. Conclusiones de la experiencia

- Por lo mostrado en los apartados 3.6.2 a 3.6.4 se deduce que el comportamiento dinámico de la celda puede ser modelado adecuadamente por el circuito de la fig. 3.1, asignándole valores constantes a los parámetros R_{ohm} , R_{ca} y C_{dc} , medidos en el rango de corrientes perteneciente a la zona óhmica. Esto determina que en este rango, la celda de hidrógeno presenta un comportamiento aproximable por el modelo lineal de pequeña señal propuesto.
- Por lo mostrado en el apartado 3.6.1 se tiene que los valores en la zona óhmica de la resistencia total R_t coinciden con los valores asignados al modelo. Por lo cual, este último describe el comportamiento estático de la celda en ese rango.

3.7.2. Consideraciones

Cabe destacar que estos resultados fueron obtenidos a partir del ensayo de una celda individual. Por lo que se debe considerar efectos no percibidos en esta experiencia a la hora de extrapolar estos resultados, ya sea el caso de una celda de mayor tamaño o un stack. En particular:

- Se debe tener en cuenta las oscilaciones anarmónicas [23], producidas por las variaciones del flujo de los gases en el stack. Las mismas pueden ser eliminadas por el convertidor DC-DC, ya que tienen una dinámica lenta comparada con los tiempos eléctricos.
- Otro efecto producido por la dinámica del flujo de los gases, es el retardo $E_{d,cell}$, descrito en el capítulo 2. El mismo se estudia en el capítulo 6.
- En el caso de celdas de mayor potencia, la temperatura se convierte en un factor de mayor influencia, sin embargo ésta tiene un efecto favorable, ya que mejora el rendimiento de la celda porque acelera la velocidad de reacción.

CAPÍTULO 4

Topología de enlace con el inversor

4.1. Introducción

En el presente capítulo se analizan las diferentes topologías para la etapa de conversión DC-DC. En particular se estudian los convertidores Push Pull y Full Bridge, sus ventajas y desventajas y diferentes configuraciones de conexión de los mismos.

4.2. Topologías clásicas más usadas

En la actualidad se trabaja intensamente en mejorar la economía, eficiencia y fiabilidad, entre otros, del circuito de conexión que se muestra en la figura 4.1.

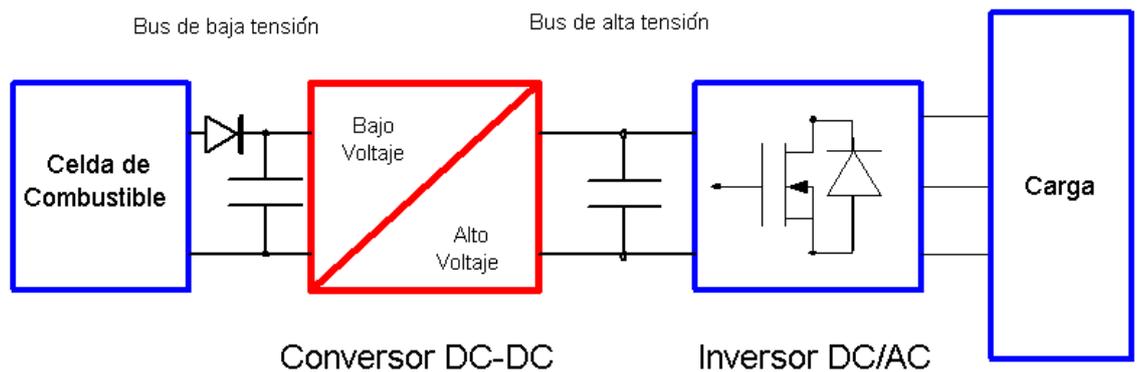


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema de conexión de la celda de combustible a una carga eléctrica

Tal como se muestra en la figura, el objetivo de este capítulo será comprender en detalle las variantes que se encuentran de la etapa de conversión DC-DC y elegir finalmente una topología en particular, basados en los criterios anteriores (economía,

eficiencia,etc) para avanzar luego en lo referente al control de dicho conversor.

La topología de elevación DC-DC más sencillas es el conversor Boost. Sin embargo, el mayor problema que presenta dicho conversor es la relación entre la tensión de entrada (del orden de 20 – 40V) y la tensión de salida (400V), es muy alta para implementaciones prácticas de dicho dispositivo. Por lo cual resulta fundamental la utilización de transformadores en la etapa de conversión. Estos a su vez presentan cualidades importantes como la aislación galvánica entre la celda de combustible y la salida de tensión alterna entre otras. Estudiaremos con mayor detalle los conversores Push Pull, Full Bridge como las alternativas más usadas, estudiaremos las ventajas y desventajas de cada implementación y analizaremos otro tipos de conversores.

4.2.1. Conversor Push Pull

En la figura 4.2 se muestra el circuito del conversor Push Pull. V_{in} representa la tensión de entrada que entrega la celda de combustible y R la carga que ve el conversor a la salida. M_1 y M_2 son mosfets de potencia encargados de la conmutación de la tensión de entrada, mientras que los diodos D_5, D_6, D_7 y D_8 rectifican la tensión de salida del transformador. Finalmente la inductancia y el capacitor constituyen el filtro pasa bajos común a todos los conversores DC-DC. Veamos el funcionamiento de este dispositivo.

Push-Pull DC/DC Converter

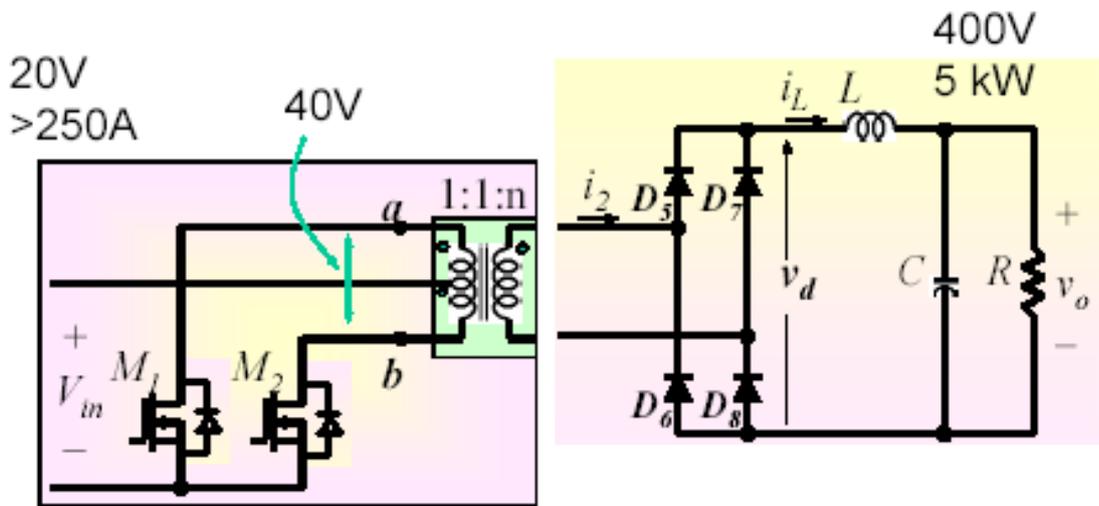


Figura 4.2: conversor Push-Pull. Los valores de tensión marcados en la figura corresponden a la tensión que generará la Celda hidrógeno a construirse en F.Ing.[12]

Como se ve en la figura 4.3, cuando M_2 está prendido con los diodos D_5 y D_8 conduciendo, se tiene que $v_d = \frac{n}{2} \cdot (V_{a,b}) = \frac{n}{2} \cdot 2V_{in}$, con lo cual la tensión en bornes de la inductancia es $V_L = n \cdot V_{in} - V_0$. Transcurrido el tiempo t_{on} durante el cual esta encendido M_2 , se apaga este último y ambos mosfets permanecen apagados durante el tiempo Δ . En este intervalo la tensión en los arrollamientos primarios ($V_{a,b}$) es cero y

por tanto $V_L = -V_0$. Cuando se enciende M_1 conducen D_7 y D_6 y el ciclo anterior se repite. La tensión de salida se obtiene igualando $\langle V_L \rangle = 0$, o sea:

$$\langle V_L \rangle = \frac{(n \cdot V_{in} - V_0) \cdot t_{on} - V_0 \cdot \Delta}{T_s/2} = 0$$

de donde resulta: $V_0 = n \cdot 2V_{in} \cdot \delta$, siendo $\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$. El máximo δ posible debe ser menor que 0,5, ya que en la práctica se requiere un tiempo muerto en el que ambas llaves estén apagadas y evitar el encendido simultáneo de las mismas.

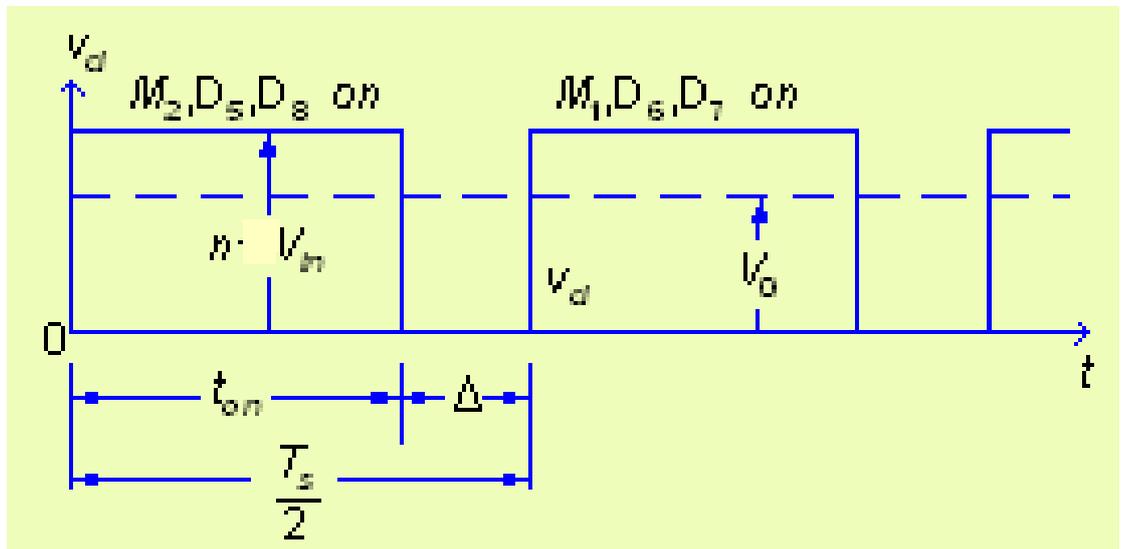


Figura 4.3: Formas de onda de la tensión a la salida del puente de diodos. No se considera en el análisis la caída de tensión de los diodos

4.2.2. Conversor Full Bridge

Otro convertidor utilizado en aplicaciones de porte residencial ($5kW$), es el Full Bridge. Su nombre se debe a que esta constituido por dos mosfets en cada una de las dos ramas de conmutación de tensión de entrada, a diferencia de la variante constituida por un mosfet por rama, el Half Bridge. El circuito se ve en la figura 4.4, y al igual que el Push Pull tiene una etapa rectificadora seguida del filtro pasa bajos del lado de alta tensión. A diferencia de este, el Full Bridge no tiene particionado el primario del transformador en dos mitades iguales por lo cual no presenta problema de asimetrías.

Full-Bridge DC/DC Converter

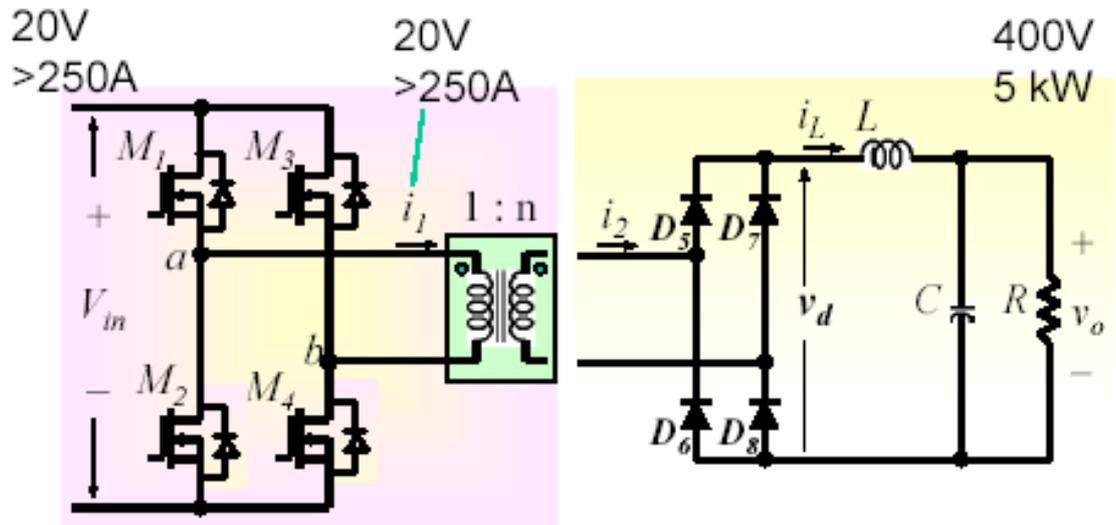


Figura 4.4: Conversor Full-Bridge. Los valores de tensión marcados en la figura corresponden a la tensión que generará la Celda hidrógeno a construirse en F.Ing.[12]

Analicemos el principio de funcionamiento de este conversor. Como muestra la figura 4.5 los mosfet funcionan de a pares a la frecuencia de conmutación establecida, de forma en que durante el tiempo $0 < t < t_{on}$, están prendidos M_1 y M_4 estableciendo $v_d = n \cdot V_{a,b} = n \cdot V_{in}$. Durante este lapso conducen D_5 y D_8 y se establece en bornes de la inductancia una tensión $V_L = n \cdot V_{in} - V_0$. Durante el siguiente lapso $t_{on} < t < t_{on} + \Delta$ las dos ramas del conversor permanecen cortadas, la tensión en el secundario del transformador se hace cero, y la inductancia queda sometida a tensión $V_L = -V_0$. En el siguiente ciclo funcionan los mosfets M_2 y M_3 con los diodos D_6 y D_7 conduciendo, obteniéndose los mismos valores de tensión en v_d . Sabiendo que el valor medio de la tensión en la inductancia es cero durante un ciclo, calculamos la tensión de salida como:

$$\langle V_L \rangle = \frac{(n \cdot V_{in} - V_0) \cdot t_{on} - V_0 \cdot \Delta}{T_s/2} = 0$$

despejando se tiene: $V_0 = n \cdot 2V_{in}\delta$, con $\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$ y $0 < \delta < 0,5$.

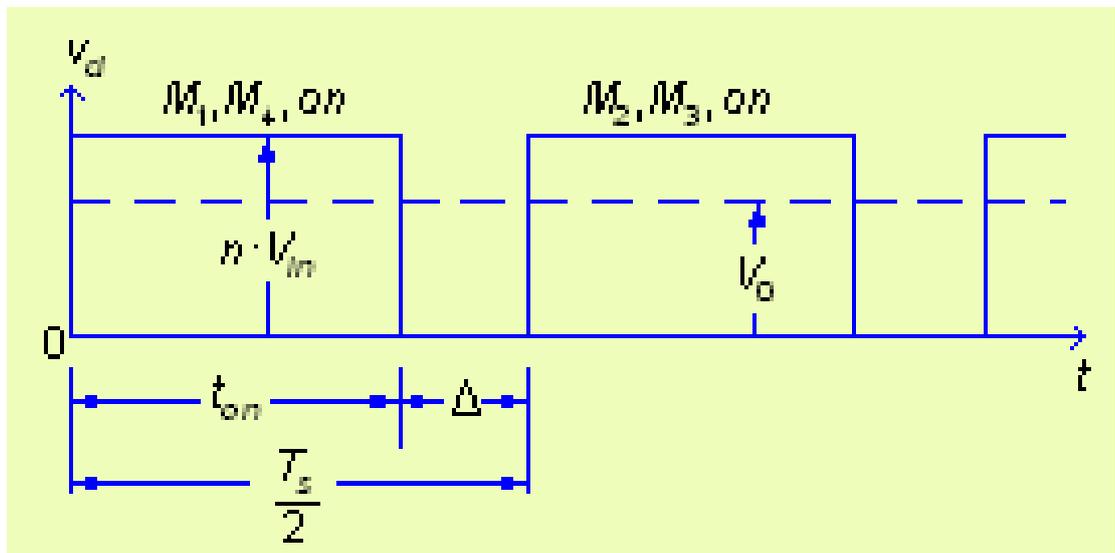


Figura 4.5: Formas de onda de la tensión a la salida del puente de diodos. No se considera en el análisis la caída de tensión de los diodos[12]

4.3. Push-Pull Vs Full-Bridge

Miremos con detalle la performance de cada uno de estos convertidores. El primer punto de vista consiste comparar tensiones y corrientes que deben soportar los mosfets, diodos, y arrollamientos del transformador en cada configuración. Así hemos realizado el cuadro 4.1 en la que se comparan estos items.

CONFIGURACION	PUSH PULL	FULL BRIDGE
Voltaje de salida	$V_0 = 2n \cdot V_{in} \cdot \delta$	$V_0 = 2n \cdot V_{in} \cdot \delta$
Voltaje en mosfets	$2V_{in}$	V_{in}
Corriente por mosfets	$I_{pico} = n \cdot I_{Lmax}$	$I_{pico} = n \cdot I_{Lmax}$
Voltaje en diodos	$n \cdot V_{in}$	$n \cdot V_{in}$
Corriente por diodos	I_{Lmax}	I_{Lmax}
Transformador	Primario con toma media 1 : 1 : n	Primario simple 1 : n
Número de mosfets	2	4
Caída de tensión en los mosfets en conducción	$R_{dson} \cdot I_{pico}$	$2R_{dson} \cdot I_{pico}$

Cuadro 4.1: Push-Pull vs Full-Bridge: se desprecian las sobretensiones en los arrollamientos producidos en la conmutacion, así como la caída de tensión en diodos y mosfets.

De acuerdo a las características presentadas en el cuadro 4.1, ambos convertidores tienen la misma relación de transformación que comparados con su dual no aislado, el Step-Down[17], la cual es $2n$. Si confrontamos la relación de transformación con la que proporciona el convertidor Half Bridge, resulta 2 veces mayor.

Ahora bien, fijemos la atención en las cualidades que los diferencian y nos encontraremos con un aspecto crítico como lo es la tensión que deben soportar los mosfets durante la conmutación. Este es un aspecto por demás importante que privilegia al convertor Full sobre el Push. De acuerdo con el cuadro 4.1, el transformador del Full Bridge tiene la ventaja de ser mas pequeño que el Push, y si bien a las potencias que manejamos los costos no hacen mayor diferencia, el tamaño podría importar en la realización de un diseño compacto. También relacionado con los aspectos constructivos se presenta el problema de la toma media del Push, ya que nunca se obtienen arrollamientos iguales, lo que genera asimetrías en las corrientes que pueden llevar a saturar el núcleo y a la posible destrucción del dispositivo.

Sin embargo el convertor Push posee dos mosfets menos en su implementación, lo cual disminuye las pérdidas en conducción dada la menor caída de tensión en éstos. A pesar de los aspectos señalados se realizan etapas conversoras utilizando el convertor Push, en algunas configuraciones que consideraremos en la siguiente sección.

4.4. Implementaciones de convertidores DC-DC

4.4.1. Push-Pull en la configuración “entrada en paralelo, salida en paralelo (EPSP)”

A continuación se presentan diversas implementaciones DC-DC. La primera de ellas está conformada por tres convertidores Push-Pull como se muestra en la figura 4.6, con sus entradas y salidas conectadas en paralelo[14].

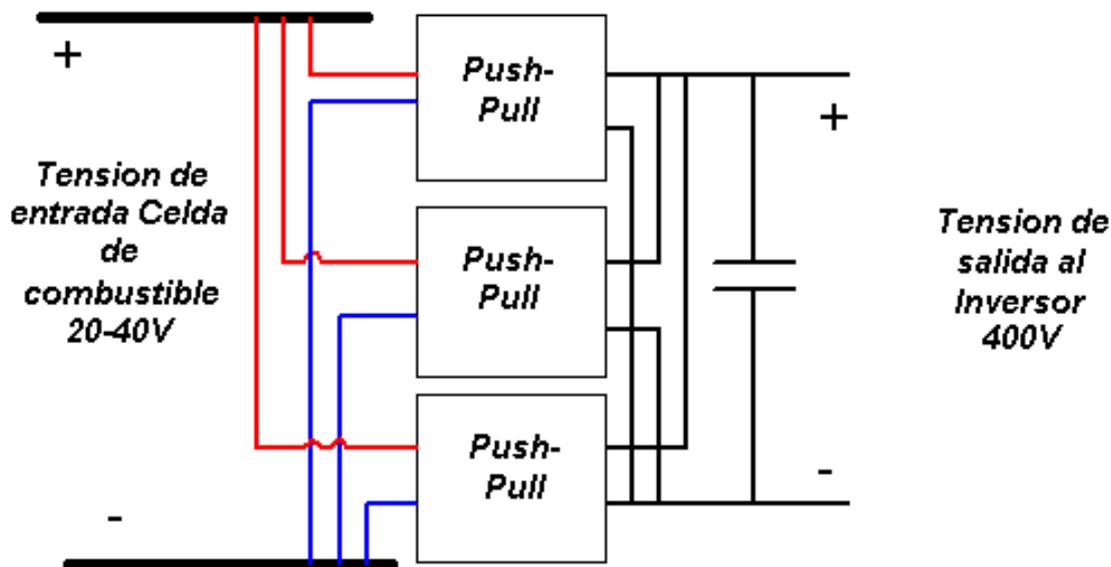


Figura 4.6: diagrama del conexionado

Este convertor requiere la conexión de un inductor adicional acoplado en el secundario del transformador a los efectos de contrarrestar los desbalances que puedan

presentarse durante cada ciclo de conmutación. La conexión del inductor se muestra en la figura 4.8.

4.4.2. Push-Pull en la configuración “entrada en paralelo, salida en serie (EPSS)”

La siguiente implementación de fuente conmutada utilizando el convertor Push, presenta la idea “entradas en paralelo, salidas serie[5]” (EPSS), ver figura 4.7, en la que se logra que cada módulo lleve parte de la corriente que entrega la celda (altas corrientes), y entregue una parte de la tensión de salida (grandes voltajes). Se logra de esta manera reducir las pérdidas de conducción y conmutación a altas corrientes así como disminuir sobretensiones causadas por la conmutación lo que se traduce en “ratings” menos exigentes de los dispositivos.

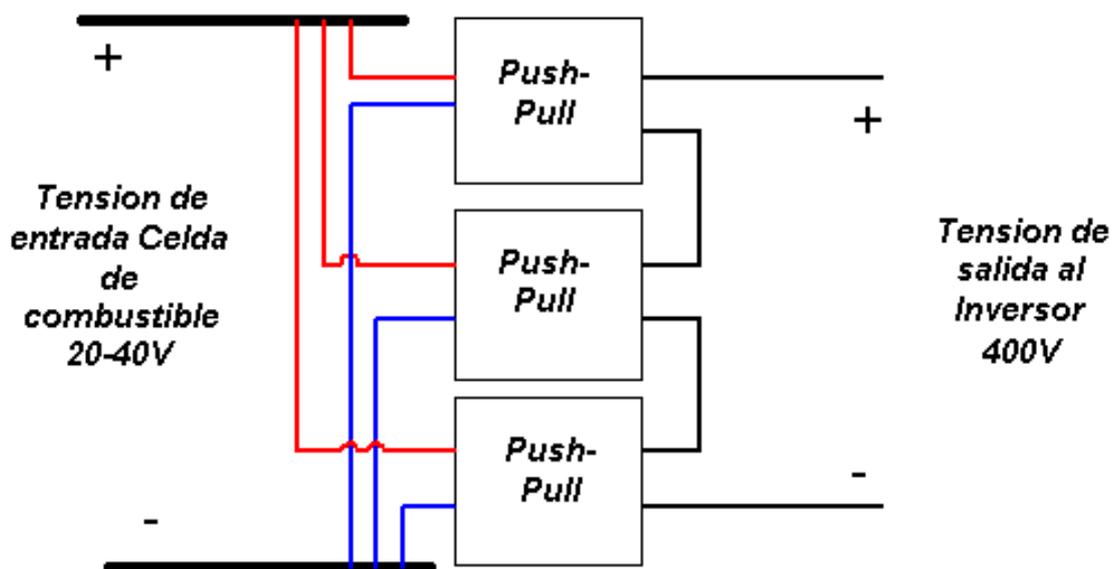


Figura 4.7: diagrama del conexionado

En la implementación mostrada cada bloque Push-Pull (módulo) es comandado independientemente de forma que cada uno de ellos establece en sus bornes una tercera parte de los 400V. Como la corriente total que entrega el dispositivo es la que circula en cada módulo, se logra que cada módulo aporte la misma potencia y por tanto se logra un reparto equitativo de la corriente de carga que se toma de la celda.

4.4.3. Full Bridge y la configuración Front End

Una aplicación semejante a la anterior pero utilizando el convertor Full Bridge, resulta cuando conectamos etapas rectificadoras en serie como se muestra en la figura 4.4.3, a partir de un mismo puente de mosfets. Este arreglo se denomina Front-End, [10].

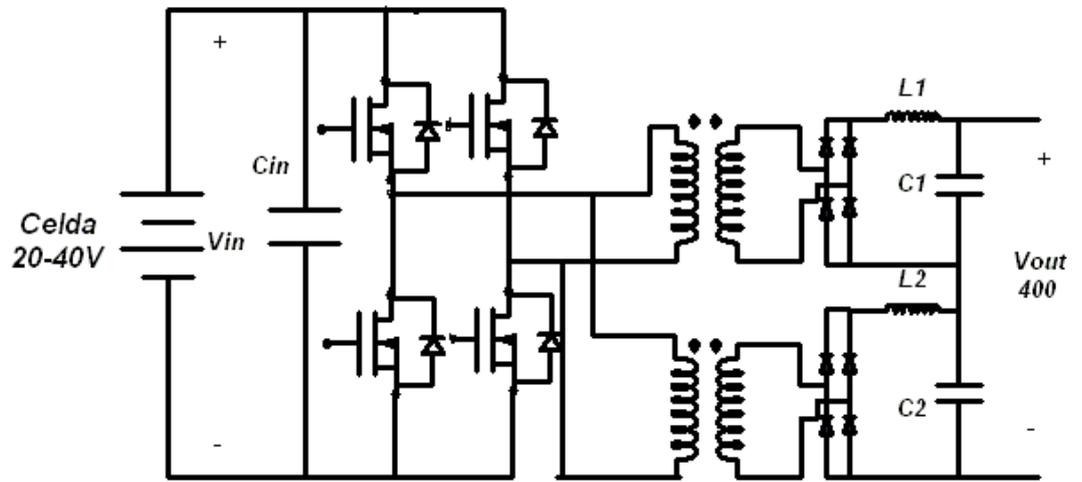


Figura 4.8: Configuración Front-End con etapas rectificadoras a la salida.

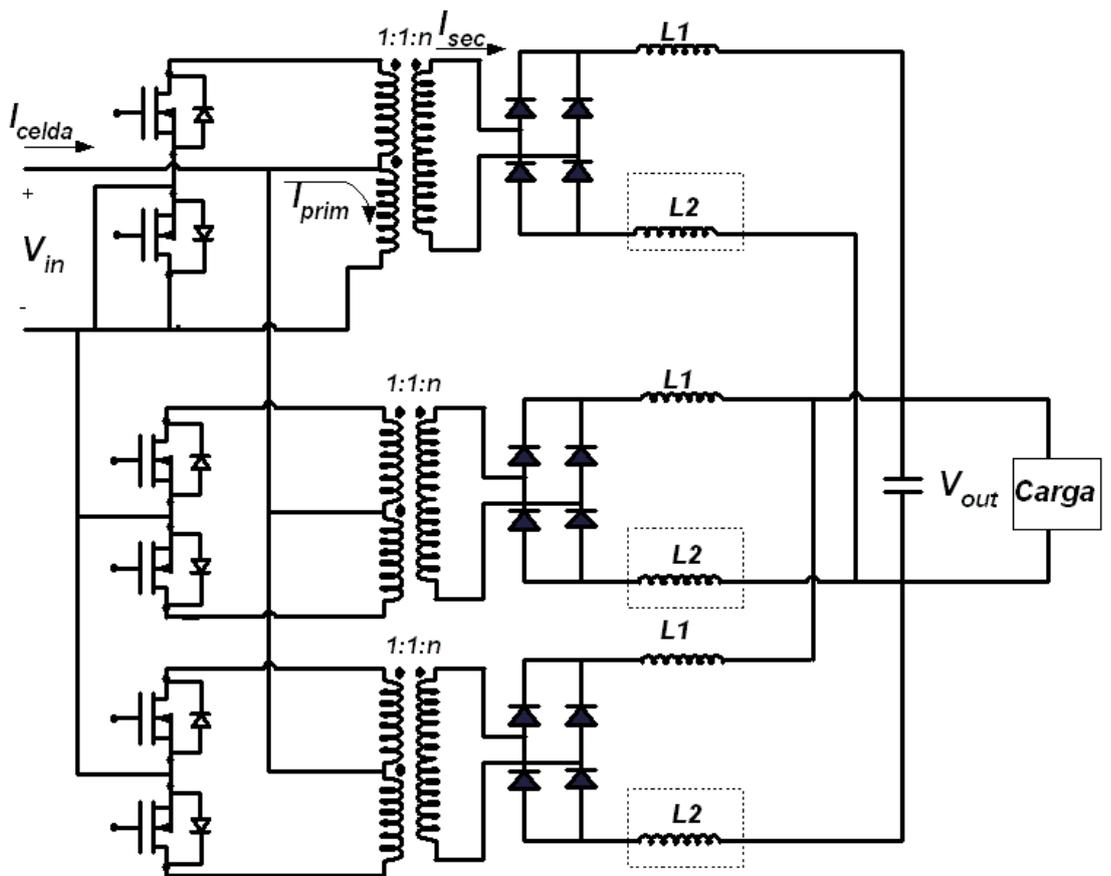


Figura 4.9: Configuración "EPSS", (entrada en paralelo, salida en paralelo).

La idea es similar a la configuración EPSS mostrada en la fig. 4.8, en donde la potencia se reparte por igual en los transformadores . A diferencia de la EPSS, se utiliza un único puente de mosfets.

Una ventaja adicional que presentan las configuraciones EPSS y Front-end es que al llevar una parte de la potencia total, cada transformador sufre menos perdidas magnéticas que si sustituyeran por uno solo. Con ello el ciclo de trabajo se ve menos disminuido y así también la relación de transformación.

5.1. Introducción

En este capítulo se introduce al lector en el tema de la calidad del servicio de distribución de energía eléctrica y sus componentes, entre los que se encuentra la calidad de onda.

La calidad del servicio se encuentra mayormente reglamentada a nivel nacional [4], aunque en lo que respecta a la calidad de onda actualmente se encuentra en fase de estudio un proyecto de regularización [25]. Los elementos a regularizar son tema de este capítulo.

5.2. Calidad del servicio de distribución

La calidad del servicio se ha convertido en un asunto muy importante tanto para los productores y distribuidores de energía eléctrica (por ejemplo UTE) como para sus clientes.

5.2.1. Importancia de la calidad del servicio de distribución

Para el sector clientes industriales por ejemplo, el impacto económico de las distorsiones del servicio puede abarcar pérdidas muy importantes. En este caso se pueden mencionar los siguientes problemas:

- Paros no programados en los equipos o en la planta.
- Daños en el producto final.
- Reinicio de equipos o de procesos.
- Aumento en las cargas por energía demandada.

También se pueden mencionar otros problemas en otros sectores como salud, seguridad, transporte, etc. Alcanza con mencionar un sencillo ejemplo y muy ilustrativo por cierto. En el preciso momento de comenzar a escribir este capítulo hubo un corte de energía eléctrica de 20 minutos de duración, que alcanzó para postergar el trabajo programado hasta el día siguiente.

Para el proveedor de energía, estas distorsiones llevan a la insatisfacción del cliente, pérdidas de carga y utilidades.

Dada la desregularización del mercado energético aparece la necesidad de reglamentar pautas sobre los aspectos de la calidad del servicio, marcando las responsabilidades de productores y consumidores.

5.2.2. Componentes de la calidad del servicio.

En la fig. 5.1 se muestra un esquema de los componentes de la calidad del servicio. Estos son la Calidad del Servicio Técnico (CST) y la Calidad del Producto Técnico (CPT).

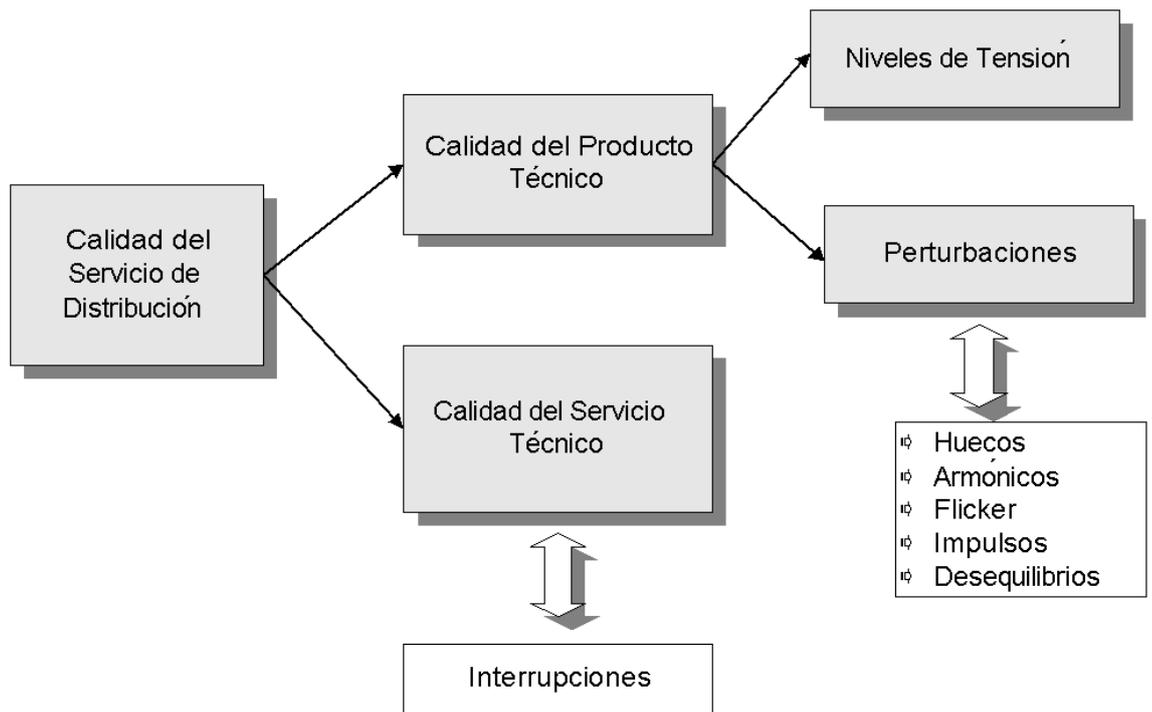


Figura 5.1: Esquema de la calidad del servicio, [25].

La CST se relaciona a las interrupciones del servicio, como se muestra en la fig. 5.1, [25].

La CPT incluye los niveles de tensión y las perturbaciones. Estas últimas pueden ser huecos, armónicos, flicker, impulsos y desequilibrios, [25], y se asocian la calidad

de onda.

Dentro de la CST está vigente a nivel nacional el reglamento [4], que abarca los temas de regulación de tensión y cortes, además de aspectos de atención a los usuarios entre otros.

En el presente capítulo se introduce al lector en el tema de la calidad de onda, el cual no está completamente regulado en [4], pero se encuentra en etapa de estudio [25].

5.3. Calidad de Onda

En la sección 5.2 se introduce el tema de la Calidad del Servicio y sus componentes, entre los cuales se destaca las perturbaciones que afectan la calidad de onda. Es importante estudiar esta última por los siguientes motivos, entre otros:

- Con la introducción y el amplio uso del equipamiento electrónico sensible, los usuarios se han preocupado y están tomado conciencia de cuan sensibles son a distorsiones en la forma de onda.
- El amplio uso de cargas no lineales (balastos, UPS, rectificadores, etc) crean armónicos en el sistema de potencia los cuales afectan tanto al equipo en planta como al equipo del distribuidor de energía.
- Han aumentado los problemas experimentados por los usuarios de la red de distribución de energía.

Estudiar y conocer la “Calidad de Onda” permite determinar los mejores métodos de corrección disponibles para sanear o limitar los problemas asociados con las distorsiones de energía.

5.3.1. Calidad de onda en nuestro país, aspectos a controlar

Se encuentra en estudio un proyecto de reglamento de calidad de energía, que surge de un convenio entre la URSEA¹ y la Facultad de Ingeniería: “Formación, Homologación, Reglamentos de Instalaciones Eléctricas y Norma de calidad de Servicio Técnico”.

Los aspectos a controlar cuando se trata de calidad de onda son: armónicos, flicker, huecos, impulsos y desbalances. Se presenta con cierto grado de detalle en qué consiste cada una de estas perturbaciones y cuál es el impacto que tienen sobre el sistema eléctrico y sobre el usuario.

Las siguientes definiciones fueron tomadas del primer informe previsto en el convenio anteriormente citado [25].

¹Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua

Armónicos

Los armónicos se definen como la deformación de la onda sinusoidal de tensión o intensidad por superposición de ondas sinusoidales de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental (50 Hz).

Los principales índices para cuantificar la distorsión armónica son:

- Distorsión Armónica Total de Voltaje $THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} V_n^2}}{V_1}$
- Distorsión Armónica Total de Corriente $THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1}$
- Distorsión Armónica Individual $HD_n = \frac{X_n}{X_1}$
- Factor de Cresta $F_C = \frac{V_{max}}{V_{RMS}}$
- Factor de Forma $F_F = \frac{V_{RMS}}{V_{AV}}$

Los armónicos se originan mayoritariamente por cargas no lineales. Este tipo de cargas, absorben corrientes no sinusoidales (aunque periódicas por lo general). Como ejemplo de cargas no lineales, se pueden citar: convertidores con semiconductores como ser variadores de velocidad y rectificadores, computadoras, hornos de arco, inductancias saturables, transformadores, máquinas rotativas, lámparas de descarga, etc.

Los armónicos en un sistema provocan efectos no deseados como:

- Aumento de pérdidas por calentamiento, lo que trae como consecuencia un envejecimiento prematuro de la aislación, deterioro de condensadores y lámparas incandescentes.
- Excitación de resonancias.
- Fallos de operación en equipos como interruptores automáticos, fusibles, relés de protección, equipos de medida, etc.
- Pares pulsantes o de frenado en motores.
- Ruido e interferencia
- Saturación de transformadores

Flicker

El efecto flicker es un fenómeno en el cual el voltaje cambia en una amplitud moderada, generalmente menos del 10% del voltaje nominal, pero que puede repetirse varias veces por segundo. Este fenómeno, también llamado “parpadeo”, causa una fluctuación en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia que es detectada por el ojo humano, así como un mal funcionamiento de cargas sensibles. El flicker es causado por cargas grandes como hornos de arco, soldadoras, laminadoras, etc.

La norma EN50160 define dos índices para dar una medida del efecto flicker. Los índices de Severidad del parpadeo de corta y larga duración. La severidad del parpadeo según la norma es la intensidad de molestia provocada por el parpadeo:

- Severidad de corta duración (Pst) medida en un período de 10 minutos. $Pst = 1$ es el umbral de la perceptibilidad.
- Severidad de larga duración (Plt) calculada a partir de una secuencia de 12 valores de Pst en un intervalo de 2 horas según la fórmula $Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{(Psti)^3}{12}}$

Huecos

Se entiende por hueco de tensión o simplemente hueco a una reducción repentina de la tensión eficaz de la onda, seguida por la recuperación de la misma después de un período de corta duración, desde medio ciclo hasta algunos segundos. Caídas de tensión de duración menor a medio ciclo no se consideran huecos. Esta definición es puramente conceptual, porque no especifica cuánto debe ser la reducción de la tensión para que tal “caída” sea considerada un hueco, tampoco se especifica una duración máxima. Los límites arbitrarios que definen un hueco, tanto de magnitud como de duración, varían según la normativa existente.

Los huecos son debidos a conmutaciones de carga que involucran grandes corrientes o a elementos de protección clarificando faltas. El origen de estos eventos puede situarse tanto en la instalación del cliente como en la propia red.

Dependiendo de la severidad del hueco, este puede provocar fallos en el equipamiento. Por ejemplo, entre otros:

- apagado de lámparas de descarga.
- Variación de velocidad o paro de motores.
- Despegue de contactores.
- Fallos y/o errores de computo en controles numéricos, computadoras, etc.
- Pérdida de sincronismo en motores y generadores sincrónicos.
- Fallas de conmutación en puentes.

Impulsos

Los impulsos son variaciones bruscas del valor instantáneo de la tensión, pudiendo llegar a ser varias veces superior al valor nominal, cuya duración oscila entre algunos microsegundos y medio ciclo de onda. Los impulsos pueden ser positivos, cuando suman a la tensión de red ó negativos, cuando restan. Por su amplitud y duración los impulsos tienen que ser analizados a partir de valores instantáneos y no mediante valores promediados.

Los impulsos pueden ser generados por agentes externos a la red o por elementos pertenecientes a la red. En su mayoría los impulsos externos a la red eléctrica son generados por descargas atmosféricas, mientras que los internos son debidos a conexiones/desconexiones de cargas con capacidad de almacenar energía, por ejemplo bancos de condensadores, transformadores, motores, convertidores, etc.

A causa de su alta tensión instantánea, los impulsos son capaces de perforar los dieléctricos provocando cortocircuitos. Por su alto $\frac{\partial v}{\partial t}$ también son capaces de destruir componentes de electrónica de potencia, tiristores, diodos, GTOs, etc. Los impulsos suelen aparecer de forma esporádica pero es posible también que se repitan a lo largo del tiempo. A los efectos de su estudio los impulsos se caracterizan por una serie de parámetros:

- Tiempo de subida: tiempo en que la tensión crece del 10 % al 90 % de la amplitud máxima.
- Tiempo de bajada: tiempo en que la tensión decrece del 100 % al 50 % de la amplitud máxima.
- Valor de pico: amplitud máxima de la tensión.
- Energía.
- Frecuencia: frecuencia de la oscilación amortiguada.

Desbalances

Un desbalance o desequilibrio de tensión es una situación donde las tensiones trifásicas difieren en amplitud o su desfase es diferente de los 120 grados nominales. El grado de desequilibrio se define, usando el Método de las Componentes Simétricas, como el cociente entre el componente de secuencia inversa (ó el componente de secuencia cero) y el componente de secuencia directa.

Los componentes de secuencia inversa y cero en la tensión son generalmente consecuencia de un consumo de corriente desbalanceado. La causa predominante de este consumo desigual es un mal balance de las cargas monofásicas conectadas a la red.

Los desequilibrios puede producir:

- Sobrecalentamiento de los bobinados en los motores de inducción.
- Mayor ripple en el bus de continua de los rectificadores polifásicos de tensión.

5.3.2. Exigencias de calidad de onda

En la medida que el país apueste a la inclusión de nuevas tecnologías de generación (como lo es la energía eólica) y desregularize el mercado eléctrico permitiendo la producción y comercialización de energía por parte de particulares, la necesidad de tener un reglamento de la calidad del servicio eléctrico resulta fundamental.

Luego de la aprobación del mismo viene la complicada tarea de la puesta en marcha y aplicación del reglamento en todo el sistema eléctrico. Es en este punto donde las exigencias del reglamento deberán ser tenidas en cuenta para toda aplicación futura, por ello la energía de la CdeC será analizada con la finalidad de satisfacer los requerimientos de calidad de onda.

A los efectos de analizar otros ejemplos de implementaciones concretas, y debido a que el reglamento sobre perturbaciones aún está en formación, se presentan las exigencias de calidad de la norma EN50160 con el fin de tener una base vigente sobre la

cual trabajar en la etapa de simulación del funcionamiento de la celda de combustible. Los límites de la normativa EN50160 se presentan en el cuadro 5.1.

Parámetros	Tiempo medida	Límites (95 % de 1 semana)	Límites (1 semana)
Variaciones de tension	10 min	$\pm 10\%$	
Armónicos	10 min	tabla hasta el 40 Arm. [18]	
THD	10 min	$< 8\%$	
Flicker	Pst 10 min Plt 120min	Plt < 1	
Huecos	10 mseg	no definido	
Desequilibrios	10 min	$< 2\%$	
Frecuencia	10 seg	$\pm 1\%$	+4 % -6 %
Interrupciones	10 mseg	no definido	
Señal de control	3 seg.	$< 5\%$	

Cuadro 5.1: Límites de la norma EN50160

Comentarios finales

Como se puede ver en el cuadro 5.1 la norma considera algunos parámetros que no aparecen en la sección 5.3.1 y otros que corresponden a los aspectos ya controlados en [4], por lo que se explicaran brevemente cada uno de ellos dando por finalizado el capítulo.

Variación de tensión: la norma establece que el 95 % de los valores medios (tomados durante 10 minutos) durante una semana deben estar en $\pm 10\%$ de la tensión nominal, lo cual ya está reglamentado a nivel nacional.

Armónicos y THD: se establece un límite [18] para cada armónico individual que no se debe sobrepasar durante el 95 % de una semana.

Flicker: se establece que el valor del factor de flicker de larga duración (Plt) no será mayor de 1 durante el 95 % de 1 semana.

Huecos: la norma define un hueco como un sobrepasamiento mayor de $\pm 10\%$ de la tensión nominal del valor RMS calculado en medio ciclo (10ms).

Desequilibrios: los desequilibrios en un Sistema de secuencia directa/inversa debe ser $< 2\%$.

Frecuencia: la frecuencia no puede diferir en $50 \pm 1\%$ durante el 95 % de una semana. En Uruguay se asume que el distribuidor no controla este parámetro por lo que este factor no se incluye en el reglamento vigente.

Interrupciones de tensión: la norma define como interrupción la caída de tensión por debajo del $\pm 1\%$ de la nominal.

Señales de control(Tensión de risado): el rizado de la señal de control no debe superar el límite marcado para su frecuencia en % de la tensión nominal. Esta norma no se ha incorporado al reglamento nacional.

CAPÍTULO 6

Propuesta de generación distribuida con celdas de combustible

6.1. Introducción

En capítulos anteriores se introduce al lector en el modelo eléctrico de una PEMFC y en la necesidad de construir sistemas para la interacción de estas fuentes de energía en sistemas de generación distribuida (GD).

En este capítulo se propone un esquema de generación distribuida utilizando celdas de combustible. Se establecen las bases de funcionamiento del sistema, y se examina en detalle la implementación en Simulink de cada una de las partes del mismo. Los esquemáticos de simulación del esquema propuesto se presentan en el apéndice. Se asume para la celda de combustible el modelo explicado en el capítulo 2 y validado para una celda real de 0.4 Watts. El sistema incluye elementos elaborados por los autores, así como otros integrados de otros proyectos, particularmente se integra un modelo Simulink de un inversor trifásico provisto por [24].

6.1.1. Panorama del capítulo

En el apartado 6.2 se explica el funcionamiento del sistema completo. En las secciones siguientes se estudia en profundidad la CdeC, el tracking de corriente, el control de corriente y el diseño del convertor. Se explica el modelo adoptado para simular la CdeC y las hipótesis en las cuales el modelo es válido.

Se analiza el algoritmo de tracking y su implementación en software.

Se desarrollan los cálculos sobre los cuales se basa el control de corriente y se diseña el convertor para que sea posible el control. Finalmente se hace una breve descripción de la etapa inversora que implementa un control de tensión además de realizar la conversión DC/AC.

6.2. Descripción del sistema

La fig. 6.1 muestra un esquema de suministro de energía en paralelo con la red de distribución. Este esquema constituye una propuesta de generación distribuida utilizando la tecnología de CdeC. De derecha a izquierda, en la fig. 6.1 se observa; la CdeC, el convertidor DC-DC y el inversor acoplado a la red de potencia a través de una inductancia de acople.

En el sistema propuesto se identifican 3 etapas.

Una primera etapa de optimización de la energía extraída de la fuente de continua (CdeC), basada en el algoritmo de tracking de potencia. Este mecanismo se posiciona en el punto de máxima potencia de la curva de potencia de una fuente. El algoritmo de tracking tiene como entradas el valor de corriente y tensión instantáneas a la salida de la CdeC. Con estos valores calcula la potencia que entrega la fuente y decide según la variación de esta última, si aumenta o disminuye la corriente solicitada a la celda, con objetivo de maximizar la potencia.

Una segunda etapa es el control de la corriente suministrada por la CdeC, para que funcione entregando la máxima potencia. El valor de corriente que calcula el tracking debe ser seguido por el control de corriente. El mismo es en lazo cerrado y se diseña para que el sistema CdeC y convertidor DC-DC siga a la corriente solicitada por el tracking. Está implementado por medio de un PWM de frecuencia portadora de 10kHz. El PWM recibe como entrada la diferencia entre la salida del tracking y la corriente de la CdeC. Esta señal es la modulante que usa el PWM para generar el comando de las llaves del convertidor. El diseño del convertidor full-bridge posibilita que la corriente entregada al VSI sea casi constante, de esta forma el conjunto CdeC-convertidor DC-DC implementa una fuente de corriente.

La última etapa la constituye el inversor DC/AC de tensión (VSI). El enlace entre la etapa de continua y la etapa inversora se realiza a través de un capacitor de enlace diseñado por [24] para mantener la tensión del bus de continua fija en 415V. La etapa inversora DC/AC desarrollada por [24] se acopla a la red de potencia y alimentan en conjunto una carga trifásica.

En suma, por una parte el convertidor DC-DC extrae la máxima potencia de la CdeC asumiendo que la tensión del capacitor de enlace es constante. Por otra parte el VSI entrega energía a la red de tal forma de mantener constante la tensión del condensador de enlace. Finalmente el control de las llaves del VSI es en modalidad de control de corriente en lazo cerrado. De esta forma el control del sistema total tiene la particularidad de ser intrínsecamente robusto y seguro ya que todas las variables peligrosas son objeto de control en lazo cerrado.

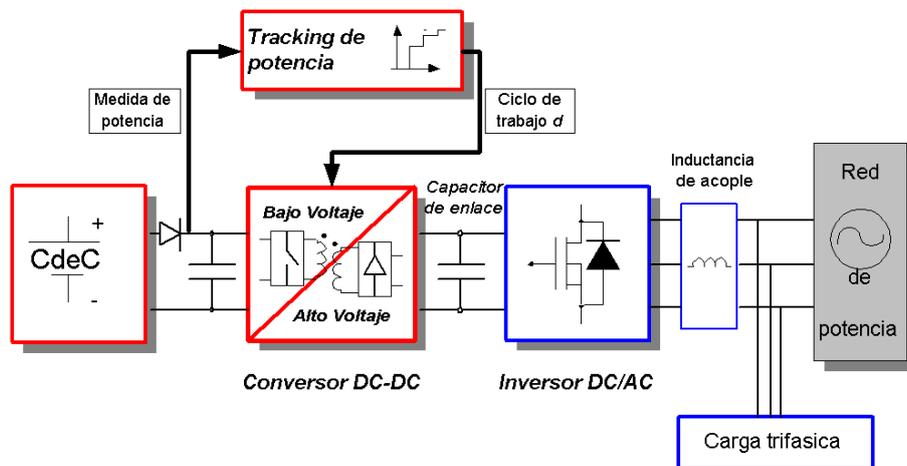


Figura 6.1: Esquema del sistema completo.

6.3. Modelo de la celda en Simulink

6.3.1. CdeC y stack

El modelo de la fig. 6.2 fue validado para una celda experimental de hidrógeno de 0.4 Watts, 0.8 Volts y corriente máxima de 1 Ampere manufacturada por Helio Centris, como se explica en el capítulo 3.

En esta validación no se tiene en cuenta el efecto de la temperatura ni el causado por el retraso (“delay”) del combustible y el oxidante sobre el voltaje de salida, representados en la fig. 6.2 por el bloque “Respuesta Termodinámica” y la fuente $E_{d,cell}$.

Las CdeC utilizadas en GD son evidentemente de una potencia mayor a 0.4 Watts deben entregar un voltaje mayor a 0.8 Volts y soportar corrientes mayores a 1 Ampere.

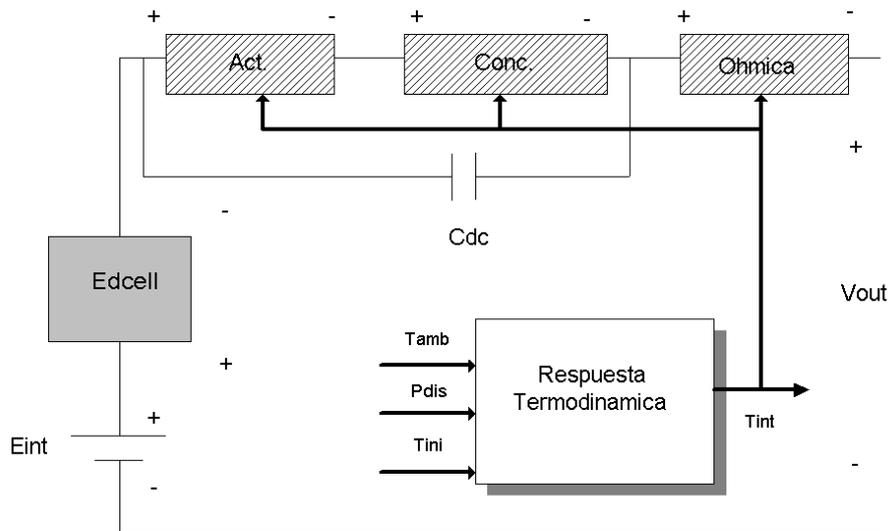


Figura 6.2: Modelo presentado en [3], para una celda de combustible. Este se asumirá como modelo válido para un stack.

Con el fin de generar mayor potencia los fabricantes construyen celdas con una membrana de mayor superficie para aumentar la densidad de corriente, ensambladas en serie para aumentar el voltaje a entregar. A esta unidad se le denomina un stack de celdas, o simplemente stack.

En el stack el combustible debe alimentar a todas las celdas incluidas en él. Frente a un cambio en la demanda de corriente se producen retardos en la propagación del combustible, los cuales afectan la tensión de salida. Además en condiciones normales de trabajo la potencia disipada por efecto Ohm en las resistencias puede afectar la temperatura del stack. Entonces en la simulación del stack condicionado a GD se debe incluir el voltaje $E_{d,cell}$ y el efecto de la temperatura, no es aconsejable en esta situación asumir las hipótesis realizadas para el caso de una sola celda de baja potencia, en donde se puede desprestigiar los efectos de la temperatura y el retraso del combustible y el oxidante.

Las simulaciones se realizan con un stack de 4.2 kW, incluyendo el efecto de la temperatura y el voltaje $E_{d,cell}$.

A continuación se adapta el modelo eléctrico del stack de celdas, para su implementación en Simulink.

6.3.2. Hipótesis de trabajo asumidas para el stack

Las hipótesis asumidas para el modelo del stack, son:

1. El modelo de un stack de celdas es el modelo de una celda.

2. Los parámetros de un stack son extrapolables a uno de mayor potencia.

La primer hipótesis fue presentada en el capítulo 2, junto con otras hipótesis, las cuales permiten en [3] validar el modelo de la fig. 6.2 para un stack en Avista Lab SR-12 de 500-W 48 celdas. Esta nos permite asumir que con los parámetros del stack es posible hallar los parámetros de una celda individual de ese stack.

La segunda hipótesis permite trabajar con un stack de mayor potencia que el original SR-12, en el cual los parámetros del modelo se hallan en base a los datos de [3].

Con estas hipótesis es posible se realizan las simulaciones del sistema con un stack de potencia acorde.

Modelo del stack SR-12.

En [3] se valida el modelo de la fig. 6.2 para un stack Avista Lab SR-12 de 500-W, compuesto por 48 celdas 0.8 Volts con una corriente máxima I_{limit} de 25 Amperes. En los cuadros 6.1 y 6.2 se incluyen los parámetros de este modelo. En la fig. A.2 del apéndice muestra el circuito que modela la dinámica de la temperatura del stack.

$E_{int}(V)$	58.9	$C_h(F)$	22000
$K_E(V/K)$	0.00085	$R_T(\Omega)$	0.0347
$\tau_e(s)$	80.0	C(F)	0.1 F
$\lambda_e(\Omega)$	0.00033	$R_{ohm0}(\Omega)$	0.2793
$\eta(V)$	20.145	$R_{ohm1}(\Omega)$	$0,001872 \times I$
$a(V/K)$	-0.1373	$R_{ohm2}(\Omega)$	$-0,0023712 \times (T - 298)$
$R_{act0}(\Omega)$	1.2581	$R_{conc0}(\Omega)$	0,080312
$R_{act2}(\Omega)$	$0,00112 \times (T - 298)$	$R_{conc2}(\Omega)$	$0,0002747 \times (T - 298)$

Cuadro 6.1: Elementos del modelo para el stack SR-12, [3].

$R_{act1}(\Omega)$	$-1,677 \times 10^{-6} I^5 + 1,2232 \times 10^{-4} I^4 - 3,4 \times 10^{-3} I^3 + 0,04545 I^2 - 0,3116 I$
$R_{conc1}(\Omega)$	$-5,2211 \times 10^{-8} I^6 - 3,4578 \times 10^{-6} I^5 + 8,6437 \times 10^{-5} I^4 - 0,0010089 I^3 + 0,005554 I^2 - 0,010542 I^1$

Cuadro 6.2: Elementos del modelo para el stack SR-12 términos superiores, [3].

Hipótesis sobre el stack SR-12

Entonces se asume que para el stack SR-12 de 500 W de [3], es válido el modelo de la fig. 6.2, en donde:

- las pérdidas por activación concentración y óhmicas se representan por los polinomios que se denominan $R_{act}(I, T)$, $R_{conc}(I, T)$ y $R_{ohm}(I, T)$ respectivamente. Estos polinomios, funciones de la corriente I , y la temperatura interna del stack T , se componen por los términos de los cuadros 6.1 y 6.2.

- la respuesta de la temperatura T , está dada por el circuito de la fig. A.2 del apéndice, en donde las resistencias térmicas R_T junto con el condensador C_h están dados en el cuadro 6.1, y la Q_{in} es la potencia disipada en las resistencias del modelo.
- Los voltajes $E_{d,cell}$ y E_{int} están dados por las ecuaciones 2.6 y 2.5 cuyos parámetros se hallan en el cuadro 6.1.

Extrapolación del stack SR-12 a un stack de mayor potencia (SR_H).

El inversor DC/AC de la fig. 6.1 ha sido diseñado para trabajar en régimen a una potencia nominal del entorno de 4kW. Por lo cual es necesario obtener los parámetros de los cuadros 6.1 y 6.2 para un stack de esta potencia.

Para obtener el stack requerido, se colocan mayor número de celdas de combustible en serie (se modela como el equivalente eléctrico en serie) y cada una con mayor capacidad de corriente (se modela como el equivalente eléctrico en paralelo). De esta forma se realiza la extrapolación del stack SR-12.

Esta extrapolación modela la construcción de este stack hipotético (SR_H), la cual está caracterizada por dos números N natural y M real positivo.

El entero N representa cuantas celdas de las que componen al SR-12 se deben colocar en serie para construir el stack SR_H . En tanto, número real M representa cuanto aumenta la capacidad de corriente de cada una de estas celdas.

Los parámetros del modelo de SR-12 dados en los cuadros 6.1 y 6.2 se modifican según M y N para formar el SR_H de la siguiente manera:

- El voltaje de vacío de cada celda aumenta N veces.
- Los voltajes $E_{d,cell}$ y E_{int} aumentan N veces.
- Las resistencias modeladas por $R_{act}(I, T)$, $R_{conc}(I, T)$ y $R_{ohm}(I, T)$ aumentan N veces (serie) y sobre ellas circula una corriente afectada en un factor $1/M$ a la corriente del SR-12 original (paralelo).
- El condensador C_{dc} aumenta M veces y disminuye en un factor de N .
- Los parámetros del circuito de respuesta térmica R_T y C_h se ven afectados en un factor de $1/(M \cdot N)$ y $(M \cdot N)$ respectivamente.

El aumento de N veces la cantidad de celdas tipo SR-12 en serie provoca el aumento de los voltajes $E_{d,cell}$ y E_{int} junto con las resistencias de activación, concentración y óhmica.

Sobre las resistencias circulará una corriente afectada por un factor de $1/M$, o sea que modelan la misma caída de tensión que una celda original con una corriente M veces mayor. Este efecto aumenta la capacidad de entregar energía en cada celda, lo cual se refleja en la respuesta estática, la cual se desplaza hacia la derecha del eje I en la fig. 6.3.3.

El efecto sobre el condensador es el de colocar N condensadores en serie y M en paralelo.

Las impedancias térmicas equivalentes se modifican en función de M y N para que la temperatura interna del stack SR_H evolucione de la misma manera que stack original. En la práctica esto se logra con equipos auxiliares de enfriamiento (convectores, intercambiadores disipadores, etc) dado que a mayor potencia se generan mayores pérdidas que provocarían mayores temperaturas de régimen. Muchas veces los diseños apuntan a la idea de aprovechar la energía térmica liberada en el stack por medio de intercambiadores que calientan agua que puede ser usada en procesos industriales o domésticos.

De esta manera, los parámetros de SR_H quedan expresados de la siguiente manera:

$$E_{0cellSR_H} = E_{0cellSR-12} \cdot N/48 \quad (6.1)$$

$$E_{dcellSR_H} = E_{dcellSR-12} \cdot N/48 \quad (6.2)$$

$$R_{actSR_H}(I, T) = R_{actSR-12}(I/M, T) \cdot N/48 \quad (6.3)$$

$$R_{concSR_H}(I, T) = R_{concSR-12}(I/M, T) \cdot N/48 \quad (6.4)$$

$$R_{ohmSR_H}(I, T) = R_{ohmSR-12}(I/M, T) \cdot N/48 \quad (6.5)$$

$$C_{dcSR_H} = C_{dcSR-12} \cdot (N/48)/M \quad (6.6)$$

$$R_{TSR_H} = R_{TSR-12}/(N/48 \cdot M) \quad (6.7)$$

$$C_{hSR_H} = C_{hSR-12} \cdot (N/48)M \quad (6.8)$$

El factor de 48 que aparece dividiendo al entero N es porque los valores de los parámetros están dados en términos del stack SR-12 que se compone de 48 celdas. Entonces si tomamos N=48 y M=1 el stack SR_H queda idéntico al SR-12 original.

6.3.3. Implementación de stack incluyendo el efecto de la temperatura.

Se implementa en Simulink el modelo desarrollado en [3] con la variación de la extrapolación arriba explicada. En la fig. A.2 del apéndice, se muestran los esquemáticos de este modelo en Simulink.

Respuestas del modelo Simulink del stack SR-12

En las figs. 6.3.3, 6.3 y 6.3.3 se muestran la respuesta estática de este modelo, la evolución de la temperatura y la potencia de este stack, respectivamente.

La simulación de la curva estática del modelo implementado, se realizó en forma idéntica a [3]. Esto es, excitando la celda desde 1.1 hasta 20.5A en pasos de 0.2A cada 40s.

Para la respuesta dinámica de la fig. 6.5 se excita a la celda con escalones de 1 A de pico superpuestos a nivel de continua en la zona de máxima potencia a intervalos de 15 segundos.

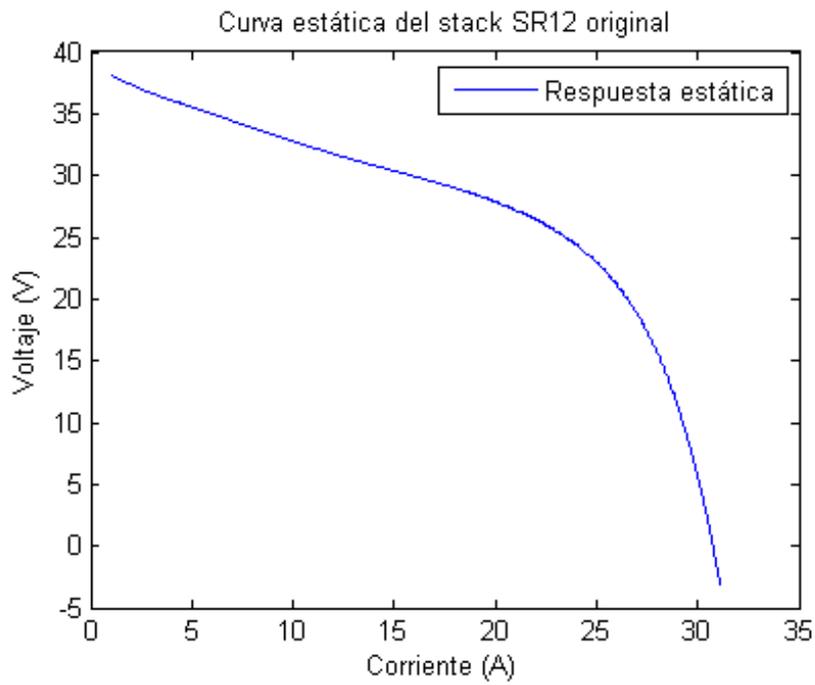


Figura 6.3: Simulación de la respuesta estática para el stack SR-12 presentado [3].

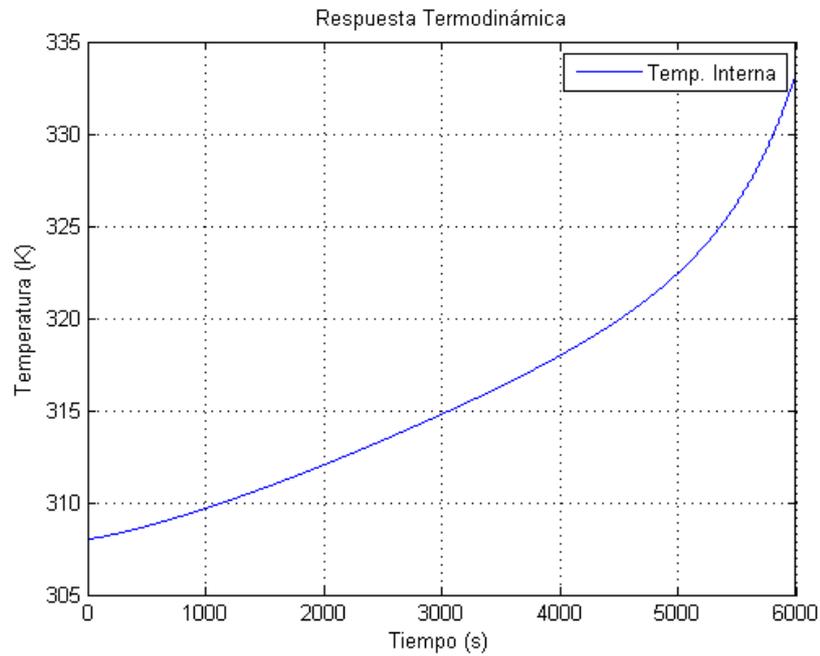


Figura 6.4: Evolución de la temperatura SR-12 Simulink, para el ensayo de 6.3.3.

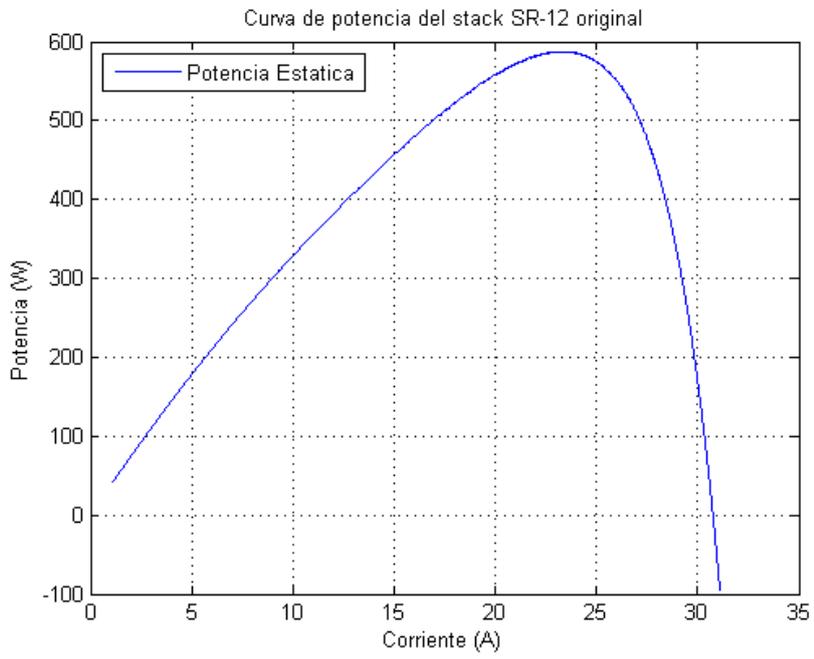


Figura 6.5: Potencia estática del SR-12 Simulink.

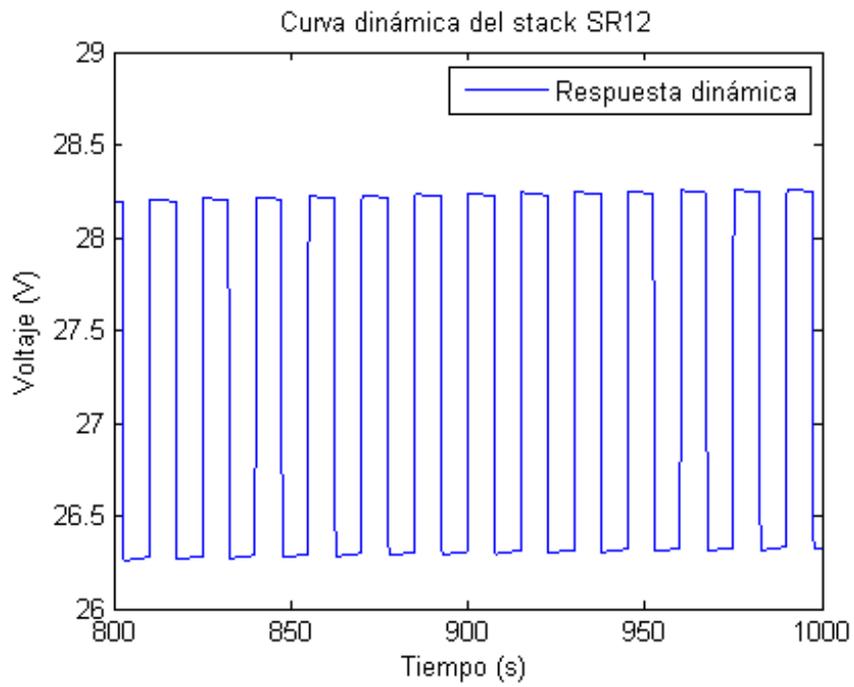


Figura 6.6: Respuesta dinámica del SR-12 Simulink.

Tanto el ensayo simulado de estado estacionario, como el ensayo simulado dinámico presentan un comportamiento consistente con las hipótesis asumidas y los resultados mostrados en [3], lo cual confirma que el modelo fue correctamente elaborado.

Respuestas del modelo extrapolado SR_H

Finalmente el modelo del stack extrapolado con el que se trabaja se configura con $M=5.6$ y $N=72$. Esto equivale a un stack hipotético de 48 V de voltaje a plena carga y 4.2 kW de potencia nominal. Estos valores se corresponden con los stacks disponibles a la venta [22].

En la fig. 6.3.3 se muestra la respuesta estática de este modelo, en la fig. 6.7 la evolución de la temperatura y en la fig. 6.3.3 se aprecia la curva de potencia de este stack.

Para la respuesta dinámica de fig. 6.9 se excita a la celda con escalones de 20 A de pico superpuestos a nivel de continua en la zona de máxima potencia a intervalos de 15 segundos.

En estado estacionario se observa que las características estáticas del stack hipotético SR_H (potencia voltaje) tienen un andamio consistente con [3]. La respuesta de la temperatura cumple con lo asumido en el apartado 6.3.2. En el ensayo dinámico el stack presenta el comportamiento consistente con [3].

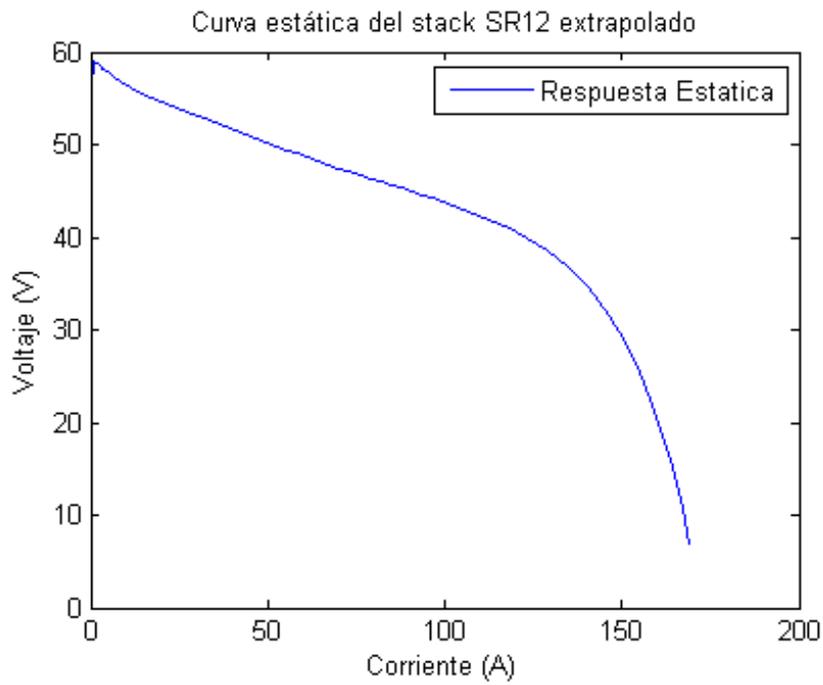


Figura 6.7: Respuesta estática del stack extrapolado.

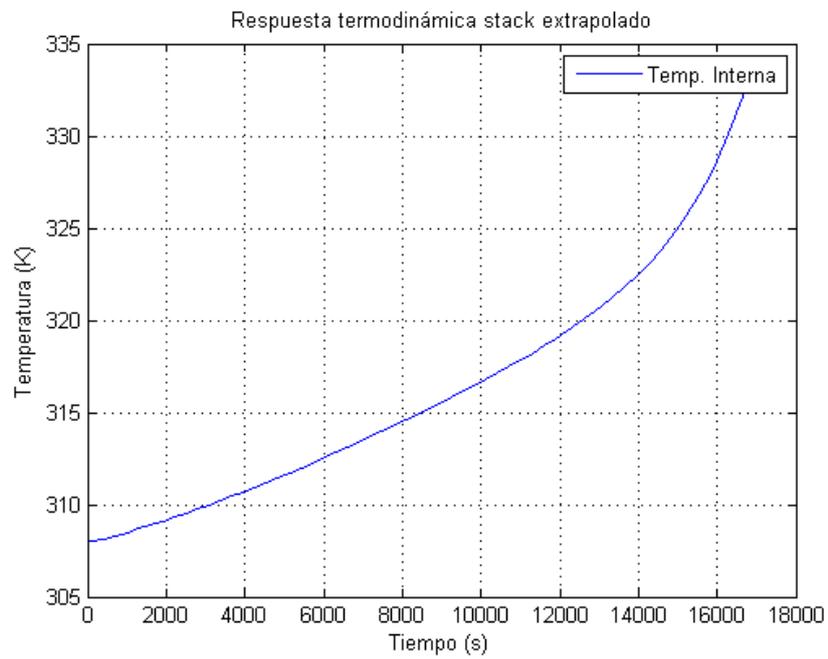


Figura 6.8: Evolución de la temperatura stack extrapolado.

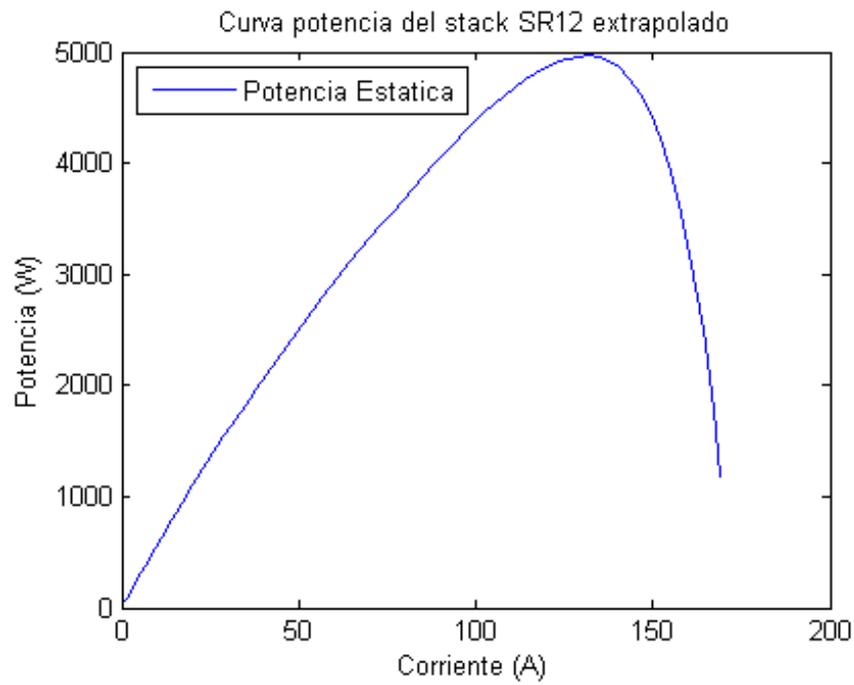


Figura 6.9: Potencia del stack extrapolado.

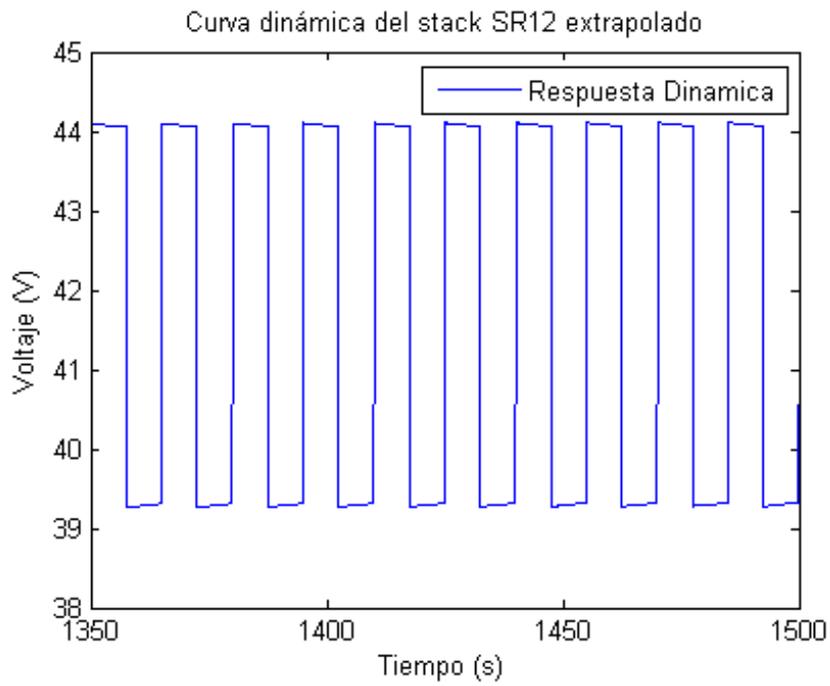


Figura 6.10: Respuesta dinámica del stack extrapolado.

6.3.4. Implementación del stack a parámetros constantes y temperatura fija en T=318 K.

Se implementa en Simulink un modelo del stack a parámetros constantes, como resultado de la linealización en el punto de máxima potencia del stack SR_H . Para esto se tomó la temperatura del mismo constante en 318K. Esta es la temperatura de régimen en el punto de máxima potencia del stack SR-12 [3].

El objetivo es realizar la mayor parte de las simulaciones con el stack de parámetros constantes. Este procedimiento permite reducir notablemente los tiempo de cálculo, a costa de introducir errores en las zonas lejanas en corriente al punto de la linealización. Aún así el comportamiento cualitativo del sistema de la fig. 6.1 es idéntico.

A continuación se compara las respuestas del modelo a parámetros constantes (M.P.C) con el SR-12 y el SR_H .

Respuestas del modelo a parámetros constantes

En la fig.6.3.4 se muestra la respuesta estática del modelo SR-12 a temperatura constante T=318K, junto con la del M.P.C, luego en la fig. 6.3.4 se grafican ambas curvas de potencia. En las figs. 6.12 y 6.3.4 se aprecian las repuestas dinámicas y la diferencia entre éstas. Finalmente en la fig. 6.14 se compara la linealización del stack SR_H y su M.P.C..

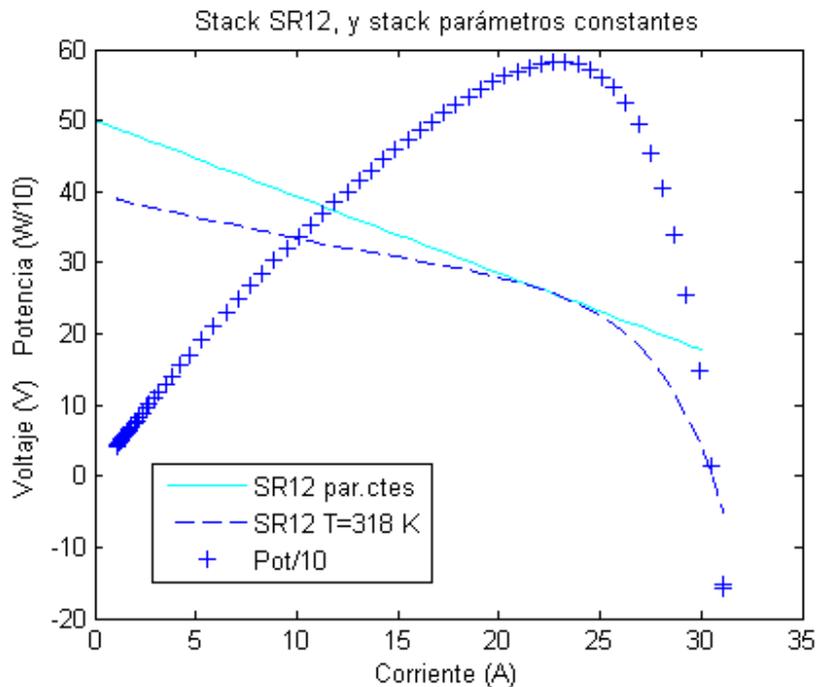


Figura 6.11: Curva estática del SR-12 original junto con la linealización a parámetros constantes

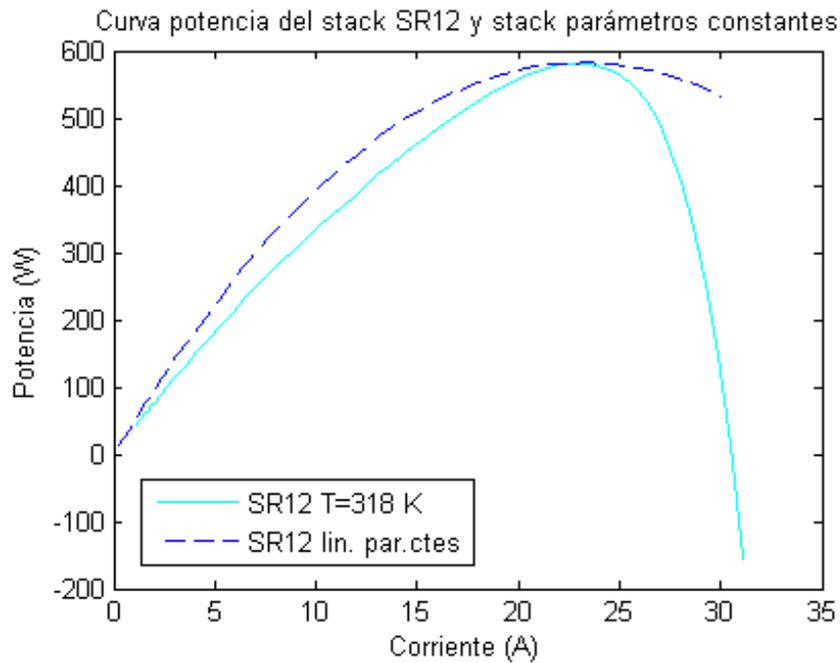


Figura 6.12: Curvas de potencia SR-12 y su linealización en la zona de máxima potencia se observa la forma de la curva de potencia.

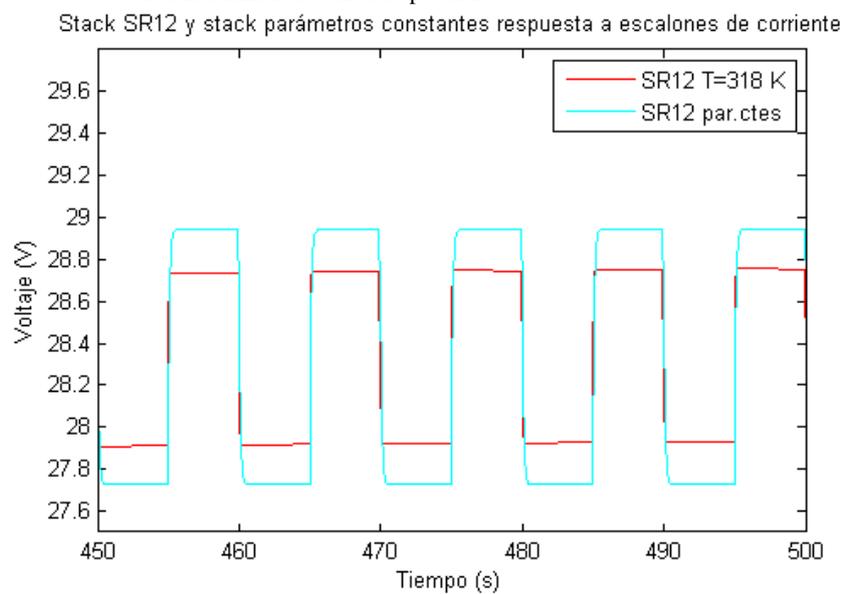


Figura 6.13: Respuesta dinámica del SR-12 y el modelo Par.Ctes.

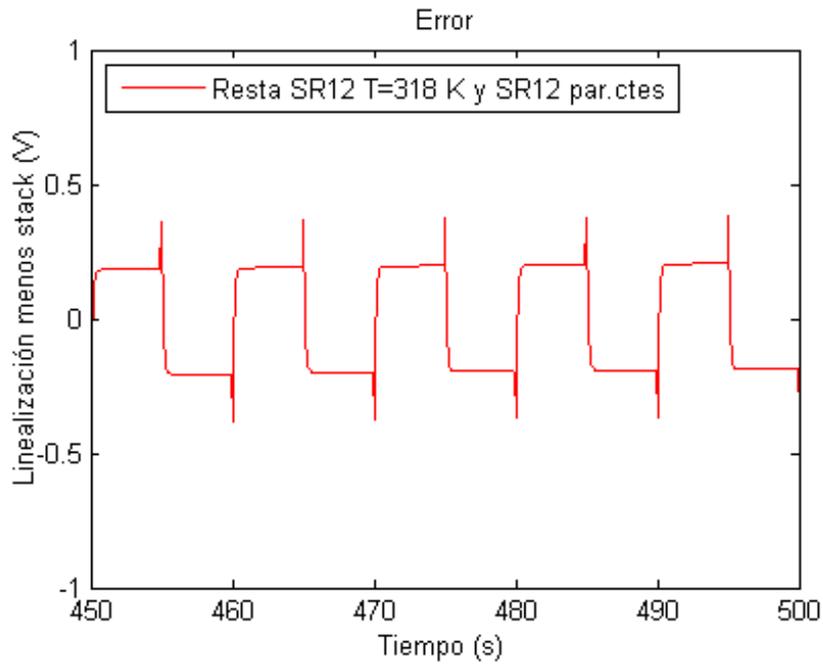


Figura 6.14: Diferencia entre respuestas dinámicas del SR-12 y el modelo Par.Ctes. Stack SR12 extrapol T=318 K, y su linealización a parámetros constantes

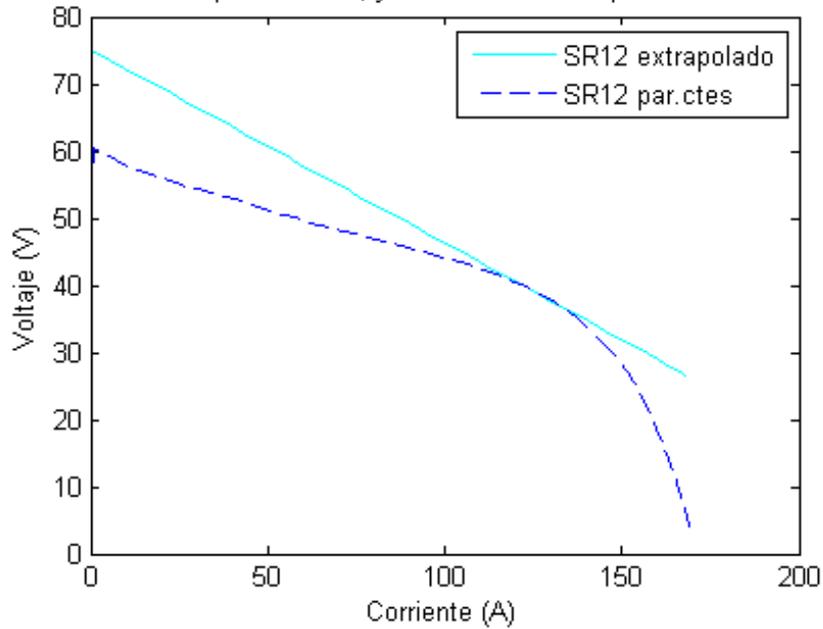


Figura 6.15: Linealización en la zona de máxima potencia del stack SR-12.

Para las características estáticas se observa como el M.P.C. se aproxima correctamente en la zona de máxima potencia. Esto es lo que garantiza que el comportamiento cualitativo del sistema sea similar dado que las curvas de potencias son tratadas de igual manera por el algoritmo de tracking.

En el ensayo dinámico se observa, para una corriente de excitación de 1A, un error menor a 0.2V comparándolo con la respuesta del stack SR-12.

6.4. Tracking de potencia y control de corriente en Simulink

6.4.1. Algoritmo de tracking

El tracking de potencia es un algoritmo de posicionamiento en torno al punto máximo de una curva característica potencia vs corriente de una fuente de energía, ya sea un generador eólico, un generador convencional o una fuente de continua como en el caso de una CdeC. Este algoritmo consiste en incrementar de a pasos (en un principio fijos, pero luego pueden ser variables) la corriente exigida a la fuente, a este valor de paso se le denominará (ΔI_k). Después de aumentar un paso la corriente se debe esperar un tiempo determinado, t_{paso} , a que evolucione la potencia alcanzada por la fuente. Al cabo de este tiempo se mide la potencia y de acuerdo al valor medido, ya sea mayor o menor al valor de potencia del paso anterior, se decide incrementar o decrementar respectivamente la corriente en un valor (ΔI_k). Este procedimiento continúa repitiéndose hasta que el algoritmo alcanza el punto de máxima potencia¹ (*PMP*) de la curva, momento a partir del cual, la corriente permanece oscilando en torno a este punto, [15].

¹El algoritmo asume que existe un único máximo en la curva de potencia.

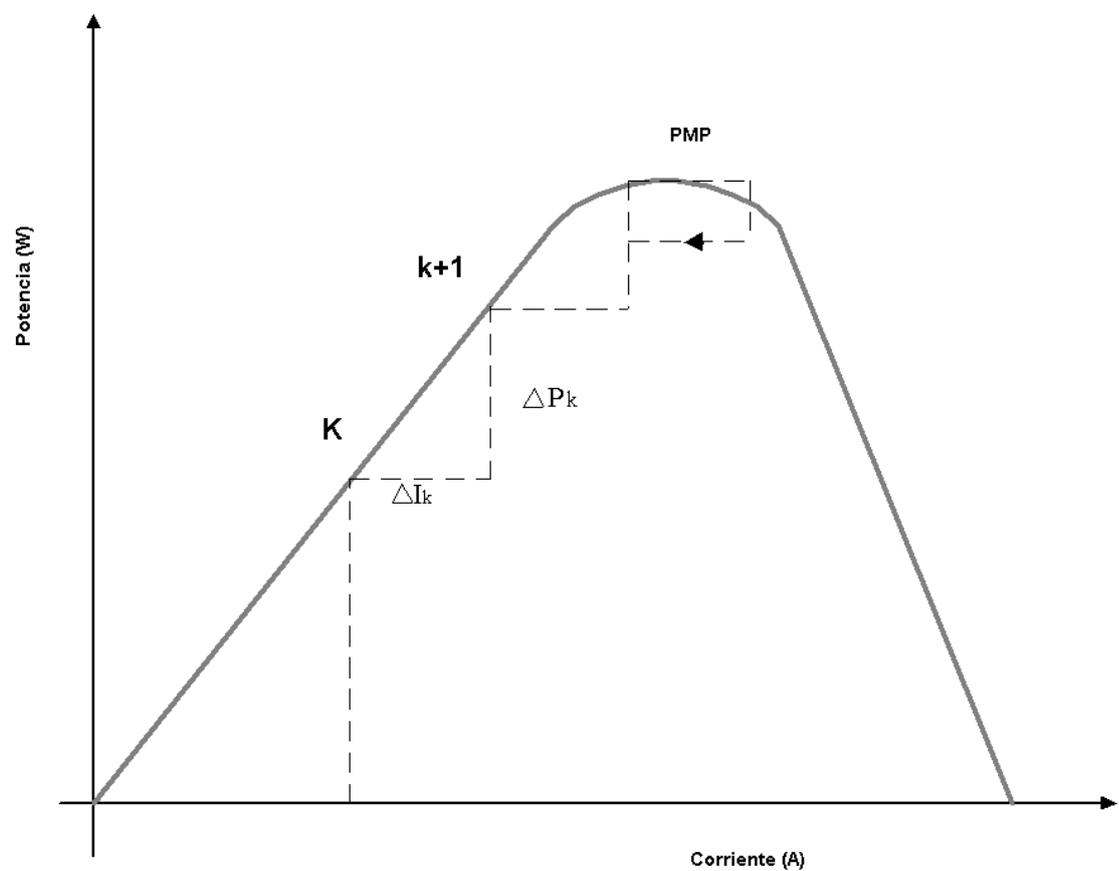


Figura 6.16: Posicionamiento del tracking en la curva de potencia.

La fig. 6.16 ilustra esta situación. En esta imagen se ve como el algoritmo escala hasta el PMP y luego que lo alcanza se observan las oscilaciones entorno a este punto. Finalmente en la fig. 6.17 se aprecia el diagrama de flujo del algoritmo de tracking.

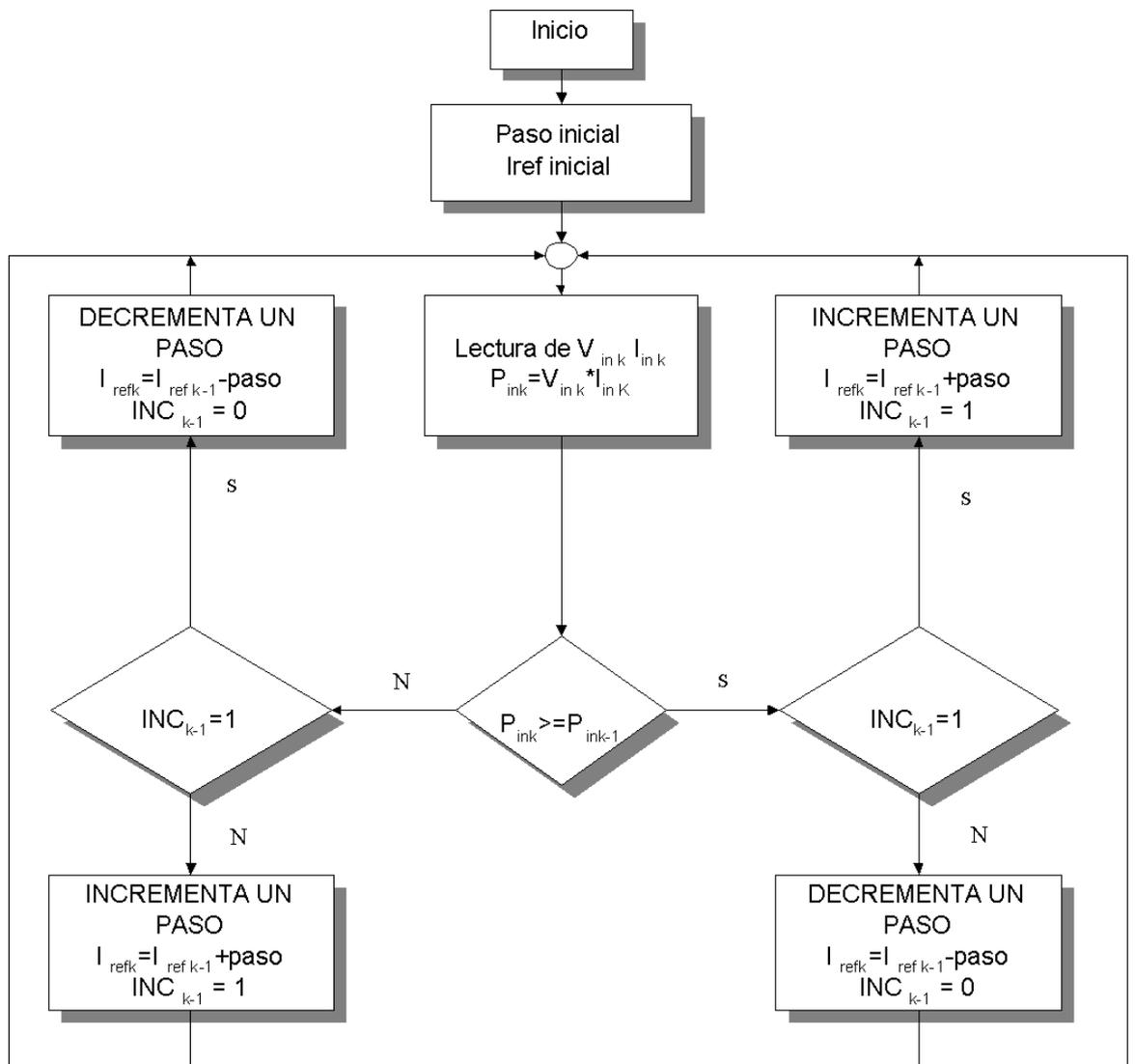


Figura 6.17: Diagrama de flujo del algoritmo de tracking.

Tracking con paso adaptativo

El tracking implementado, ver la fig. A.12 del apéndice, presenta la característica de ser de paso adaptativo. El paso adaptativo permite reducir el paso de corriente ΔI_k una vez que la búsqueda del PMP llegó a régimen y la corriente que impone el algoritmo se encuentra oscilando entorno a ese punto. Esta reducción progresiva del paso de corriente se realiza hasta un valor límite $\Delta I_{klimit} > 0$, que se calcula como porcentaje del valor inicial del paso de corriente.

6.4.2. Diseño del convertor DC-DC y controlador de corriente

En el capítulo 4 se comparan las configuraciones de convertidores DC-DC usuales en la etapa previa a la conversión de energía continua en alterna. Se muestra el funcionamiento clásico del convertor como elevador, manteniendo un valor estable de tensión a la salida.

Sin embargo la presente propuesta de generación distribuida requiere mantener en esta etapa la corriente que se entrega al VSI en un valor constante, o sea, adaptar el funcionamiento del convertor al de una fuente de corriente constante en función de la máxima potencia extraíble del stack de CdeC. En este sentido se orienta el diseño del convertidor DC-DC y se desarrolla para tal fin el control de corriente que entrega el stack.

Linealización del circuito celda y convertor DC-DC

Para implementar el control de corriente se linealiza el circuito conformado por el stack, el convertor y la carga en torno al punto de funcionamiento de máxima potencia.

El stack se modela como una fuente de tensión de valor igual a la tensión de vacío $E_{cel} = 75V$, en serie con la resistencia óhmica (R_{cel}) del circuito equivalente (fig. 6.18). No se considera el valor de las resistencias de activación y concentración ya que a la frecuencia de trabajo (10kHz) el condensador de doble capa interno de la celda se comporta como un cortocircuito.

El convertor DC-DC elegido para el enlace con el VSI es el Full-Bridge, cuya performance se analizó en el capítulo 4.

La carga vista por el convertor DC-DC modelada como fuente de tensión, E_o , refleja el comportamiento del control de tensión que implementa la etapa inversora [24], encargada de mantener constante el valor de tensión en el condensador de enlace entre etapas.

A continuación se desarrollan las ecuaciones del sistema:

Llaves en ON:

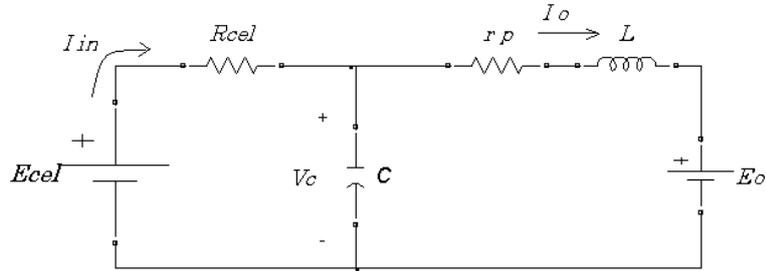


Figura 6.18: Circuito equivalente de la celda y Full-Bridge, visto desde el primario con las llaves cerradas.

Ecuaciones del sistema:

$$v_c - r_p \cdot i_o - L \cdot \frac{\partial i_o}{\partial t} = E_o \Rightarrow \frac{\partial i_o}{\partial t} = \frac{v_c - r_p \cdot i_o - E_o}{L}$$

$$i_{in} - i_o = C \cdot \frac{\partial v_c}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial v_c}{\partial t} = \frac{i_{in} - i_o}{C}$$

$$i_{in} = \frac{E_{cel} - v_c}{R_{cel}}$$

i_{in} , es la corriente entregada por el stack.

i_o , es la corriente entregada al VSI.

v_c , tensión en bornes del supercapacitor.

Ecuaciones en variables de estado para el circuito ON:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_o \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & \frac{-1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_o \\ E_{cel} \end{bmatrix}$$

Llaves en OFF:

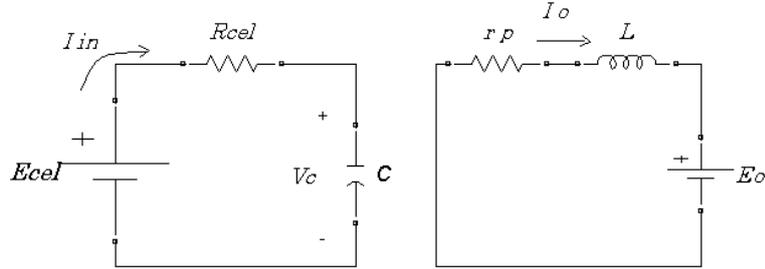


Figura 6.19: Circuito equivalente cuando las llaves están abiertas.

Ecuaciones del sistema:

$$\frac{\partial i_o}{\partial t} = \frac{v_c - r_p \cdot i_o - E_o}{L}$$

$$i_{in} = \frac{E_{cel} - v_c}{R_{cel}}$$

Ecuaciones en variables de estado para el circuito OFF:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_o \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L} & 0 \\ \frac{-1}{C} & \frac{-1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_o \\ E_{cel} \end{bmatrix}$$

La salida en ambos casos es:

$$i_{in} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{R_{cel}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_{cel}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_o \\ E_{cel} \end{bmatrix}$$

Promediando la descripción en variables de estado usando el ciclo de trabajo de las llaves (d) [17], se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_o \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L} & \frac{d}{L} \\ \frac{-1}{C} & \frac{-1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_o \\ E_{cel} \end{bmatrix}$$

Introduciendo pequeñas perturbaciones y separando en componentes de continua y de señal resulta:

$$d = D + \tilde{d}$$

$$i_o = I_o + \tilde{i}_o$$

$$v_c = V_c + \tilde{v}_c$$

Se considera que las entradas E_{cel} y E_o se mantienen constantes. En régimen los valores de las tensiones y corrientes quedan determinados por:

$$I_o = \frac{V_c \cdot D - E_o}{r_p}$$

$$V_c = E_{cel} - I_o \cdot R_{cel} \Rightarrow V_c = (E_{cel} + E_o \cdot \frac{R_{cel}}{r_p}) \cdot \frac{1}{1 + D \frac{R_{cel}}{r_p}}$$

$$I_{in} = \frac{E_{cel} - V_c}{R_{cel}}$$

En señal los valores correspondientes quedan determinados por:

$$\dot{i}_o = -i_o \cdot \frac{r_p}{L} + \tilde{v}_c \cdot \frac{D}{L} + \tilde{d} \cdot \frac{V_c}{L}$$

$$\dot{\tilde{v}}_c = -i_o \cdot \frac{1}{C} - \tilde{v}_c \cdot \frac{1}{R_{cel}C}$$

$$\dot{\tilde{i}}_{in} = -\frac{1}{R_{cel}} \cdot \tilde{v}_c$$

No se toman en cuenta los términos de segundo orden. Pasando al dominio en Laplace y despejando se obtiene la transferencia:

$$\frac{\tilde{i}_{in}}{\tilde{d}} = \frac{V_c}{R_{cel}LC} \cdot \frac{1}{s^2 + (\alpha + \frac{r_p}{L})s + \frac{D}{LC} + (\alpha \frac{r_p}{L})} \quad (6.9)$$

donde $\alpha = \frac{1}{R_{cel}C}$

Criterios de diseño del convertor

- $I_o = \frac{V_c D - E_o}{r_p} > 0$. La tensión en el condensador de enlace vista desde el primario del circuito es $E_o = \frac{E_{out}}{n} = \frac{400}{n}$. Seleccionando un ciclo de trabajo $D = 0,5$ y considerando una tensión mínima en el stack $V_c = 35V$, la relación de transformación queda determinada por $n > \frac{400}{35 \cdot 0,5} = 23$. Se selecciona $n = 25$.
- Ripple en la corriente entregada al VSI. Se diseña el inductor del filtro para que el máximo ripple no supere los $0,1A$. Por tanto, $\Delta I = \frac{n \cdot V_d - V_{out}}{L} \cdot D \cdot T \leq 100mA$. V_d representa la tensión de salida del puente de diodos. Despejando el valor del inductor resulta: $L \geq D \cdot T \cdot \frac{n \cdot V_d - V_{out}}{\Delta I} = 0,5 \cdot 0,1ms \cdot \frac{(25 \cdot 35 - 400)V}{100mA} = 220mH$. Se toma $L = 250mH$.
- Disipación de potencia en la inductancia. Se considera que la inductancia no puede disipar mas de 1% de la potencia entregada, es decir $r_L \cdot I_{out}^2 = 40W \Rightarrow r_L = 0,4\Omega$. La resistencia r_p de la figura 6.18 se relaciona con r_L por $r_p = \frac{r_L}{n^2}$, en tanto que $I_{out} = \frac{I_o}{n} = 10A$
- Dimensionamiento del capacitor:
Considerando que el stack entrega corriente I_{in} aproximadamente constante, el valor del ripple de tensión en bornes del capacitor queda determinado por $V_{c-pp} = \frac{I_{in}}{2Cf}$. El ripple de corriente en tanto es $I_{in-pp} = \frac{I_{in}}{2RCf}$. Admitiendo una variación de $I_{in-pp} = 0,02A$ el capacitor debe tener una capacidad de $C = \frac{1}{2 \cdot 85m\Omega \cdot 10kHz \cdot 0,02} = 29,4mF$. Se elige $C = 47mF$

Con los valores calculados se obtienen los coeficientes de la ecuación (6.9):

$$\frac{\tilde{i}_{in}}{\tilde{d}} = \frac{20,4 \times 10^6}{s^2 + 252s + 27 \times 10^3}$$

Sistema de 2° grado con polos en $s = -126 \pm 105,5i$.

Se analizaron diversos controladores para los requisitos de error nulo y rápida respuesta escalón. Finalmente se opta por implementar un control PI para controlar la corriente que entrega la celda al variar el ciclo de trabajo.

$$PI = k_p \left(1 + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{1}{s} \right)$$

Con este controlador la expresión total en lazo cerrado es:

$$H(s) = k_p \cdot \frac{A \cdot \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{s^3 + 2\xi\omega_n s^2 + (\omega_n^2 + Ak_p)s + k_i A}$$

Siendo $A = 20,4 \times 10^6$, $2\xi\omega_n = 252$, $\omega_n^2 = 27 \times 10^3$. Reescribiendo el denominador en la forma $(s + p) \cdot (s^2 + \alpha s + \beta)$, se obtiene el siguiente sistemas de ecuaciones:

$$\begin{cases} p + \alpha = 2\xi\omega_n \\ p\alpha + \beta = \omega_n^2 + A \cdot k_p \\ p\beta = A \cdot k_i \end{cases}$$

Se toman como condiciones de diseño que el polo real sea tal que $3\tau \leq 0,15$. Esto es porque 0,15 segundos es el tiempo de paso del tracking de potencia. De aquí resulta $p = 20$.

La otra condición de diseño es que el valor de ganancia k_p sea tal que el PWM no sature frente a un escalón de $25A$ en la corriente, dado que el primer paso de tracking es de esa amplitud. Se toma $k_p = \frac{1}{50} = 0,02$. Los restantes valores son: $\alpha = 232$, $\beta = 430,36 \times 10^6$ y $k_i = 0,422$. En las figs. 6.20 y 6.21 se muestra el lugar de las raíces con la ubicación de los polos del sistema, y la respuesta escalón respectivamente, con los parámetros de diseño.

El sistema bajo las condiciones de diseño establecidas presenta un margen de fase de 32° , un sobretiro de 50% y un tiempo de asentamiento de $t_s = 0,05\text{seg}$. Este tiempo es menor que el tiempo de respuesta del tracking, $0,15\text{seg}$. El sobretiro se puede mejorar tomando tiempos de asentamiento superiores.

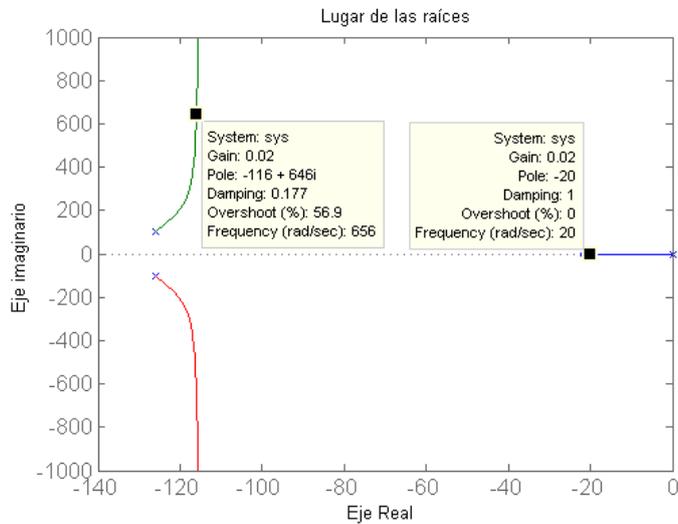


Figura 6.20: Ubicación de los polos del sistema controlado.

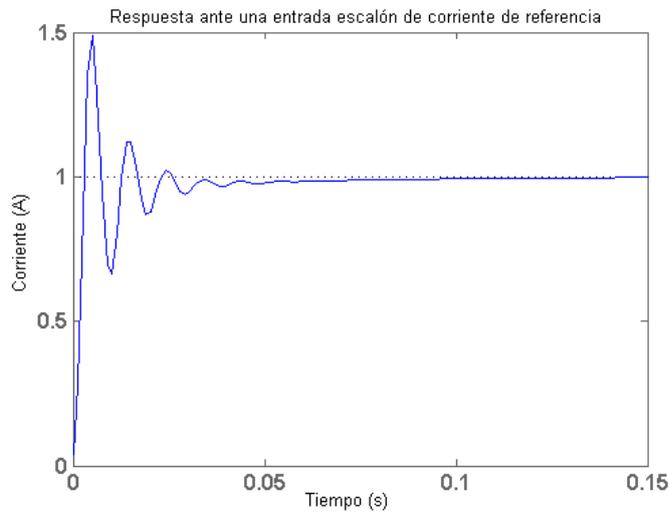


Figura 6.21: Respuesta al escalón con los parámetros de diseño.

6.5. Etapa Inversion DC/AC

Esta etapa se encarga de transformar la energía que entrega la celda de combustible, de corriente constante, a corriente alterna para enviar energía a la red eléctrica a frecuencia industrial de 50Hz . Para ello la etapa inversora o VSI, implementa dos tipo de controles. Un control de tensión, que tiene como objetivo mantener constante la tensión en el condensador de enlace, ver fig. 6.1, y un control de corriente que permite rápida

respuesta frente a transitorios y bajo contenido de armónicos en la corriente inyectada a la red [24].

A los efectos de integrar esta etapa al sistema de GD, se analiza el VSI como caja negra, es decir, se visualizan sus entradas y sus salidas. En las figs. A.14 y A.15 del apéndice se muestra el circuito caja negra así como el circuito de potencia del VSI.

6.6. Simulación de la celda, el tracking de potencia y control de corriente

Después del análisis del sistema de generación de la fig. 6.1 y de profundizar en cada uno de los elementos que lo componen se debe comprobar su comportamiento por medio de simulaciones.

Las simulaciones del sistema **completo** (donde se incluye el inversor DC/AC) con un análisis de distintas situaciones se presentan en el capítulo 7.

En esta sección se muestran los resultados de dos simulaciones sencillas para mostrar el comportamiento del sub sistema de la fig. 6.22, la primera incluye el stack SR_H , el convertor DC/DC el tracking y el control PWM en tanto la segunda se cambia el SR_H por el MPC.

El enlace entre el convertor DC-DC y el inversor se sustituye por una fuente de voltaje constante, emulando el voltaje a la entrada del inversor.

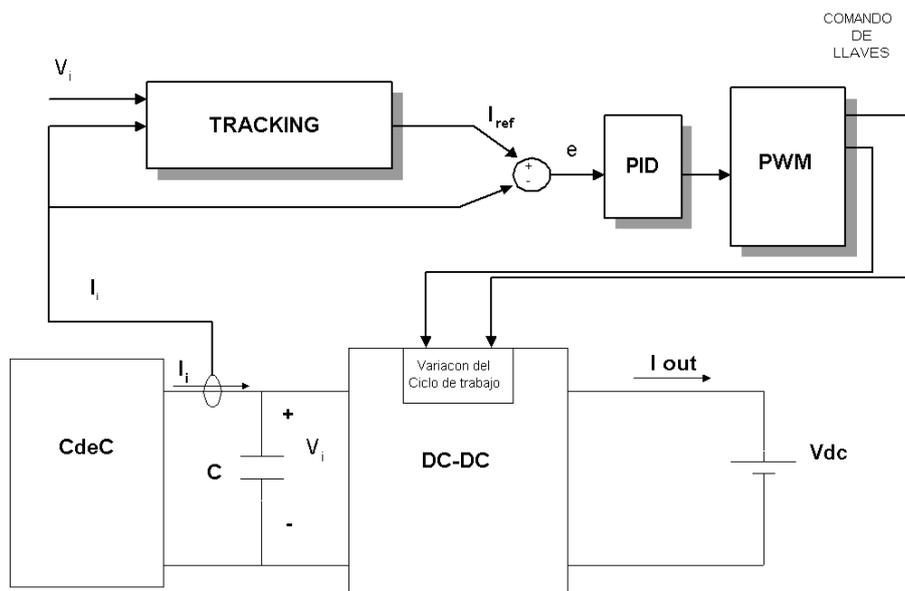


Figura 6.22: Esquema del sub sistema CdeC, convertor DC-DC, tracking con PWM, cargado con una fuente de continua.

Para la simulación al condensador de entrada al puente denominado C en la fig. 6.22, se le impone una condición inicial de voltaje igual a la tensión de vacío del stack, con el fin de evitar transitorios causados por el flujo de energía entre el condensador y el stack.

6.6.1. Resultados de la simulación con el stack SR_H

En la fig. 6.6.1 se muestra la corriente de salida del stack junto con la corriente I_{ref} , calculada por el control de tracking mientras que en la imagen de la fig. 6.23 se observa la evolución de la temperatura interna del stack. El lazo de control obliga a la corriente de la celda a seguir a la corriente I_{ref} , en régimen el error tiende a cero (señal e de la fig. 6.22).

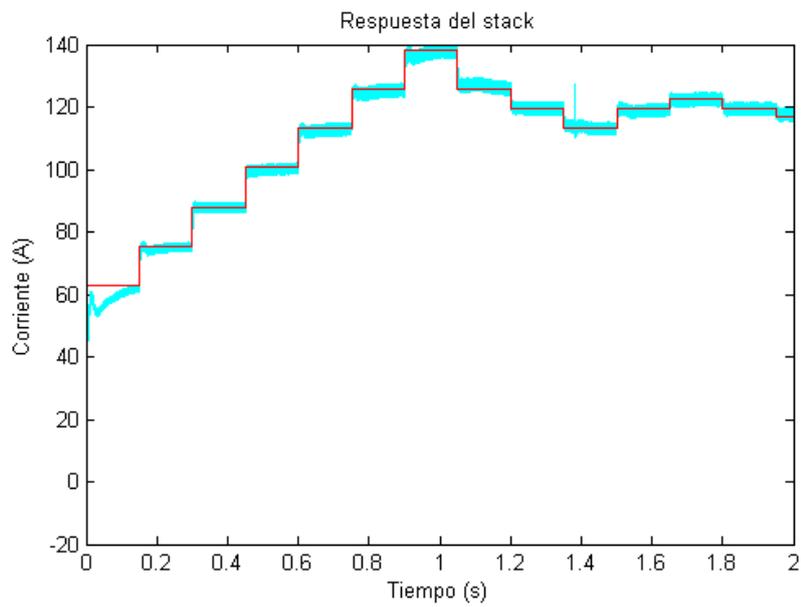


Figura 6.23: Corriente de salida del stack bajo el efecto del tracking junto con la I_{ref} calculada para realizar el control.

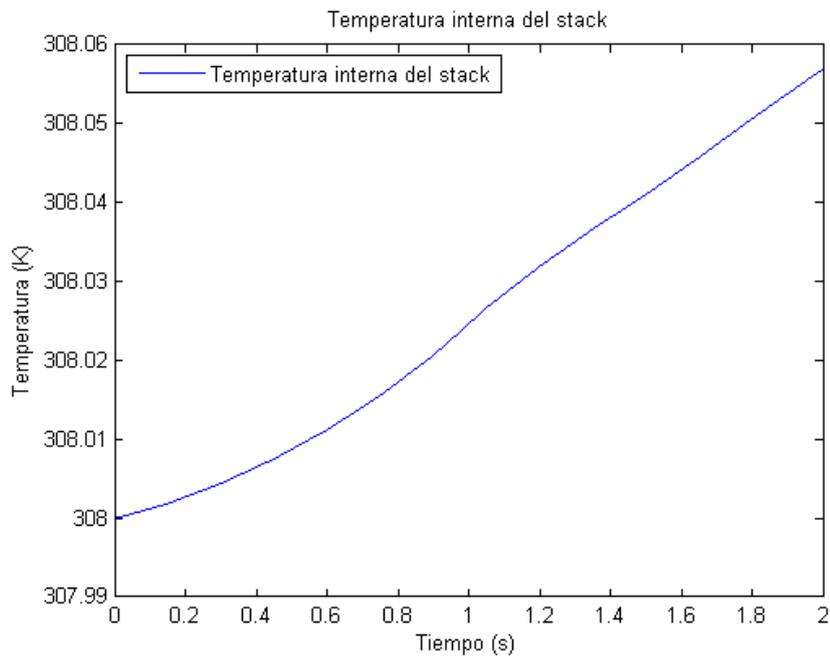


Figura 6.24: Temperatura del stack SR_H en la simulación.

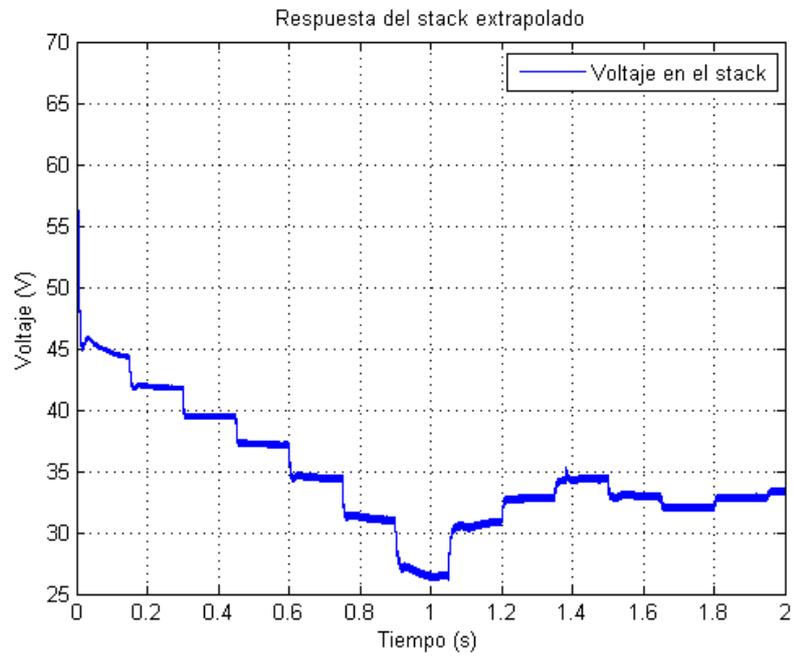


Figura 6.25: Voltaje de salida del stack.

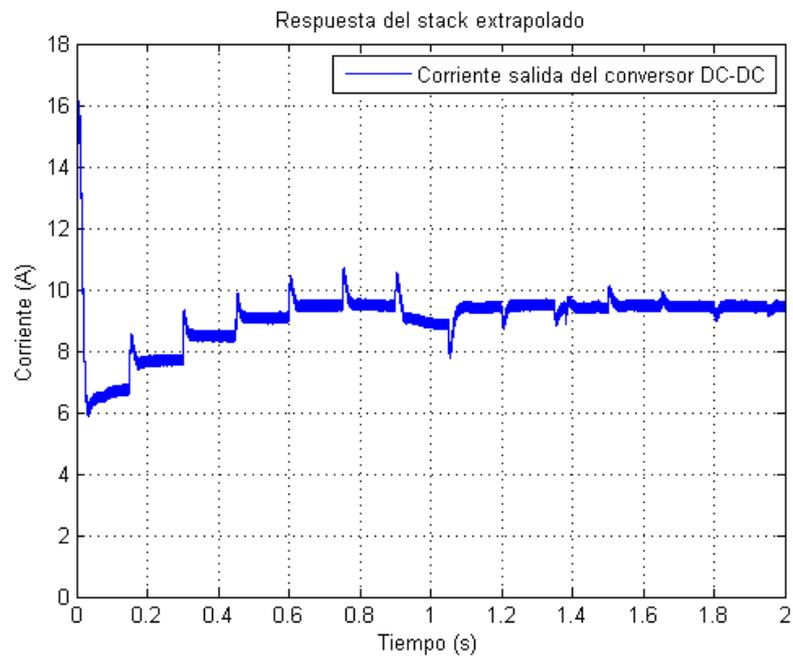


Figura 6.26: Corriente de salida del conversor DC-DC.

Se observa a partir de la gráfica de la fig. 6.6.1 que el punto de máxima potencia

se encuentra en 120 A, mientras que la respuesta de potencia estática de la fig. 6.3.3 muestra que dicho punto se encuentra en los 130 A para el mismo stack . Esta diferencia se explica por la diferencia de temperatura interna de los stack en cada una de las simulaciones, como se puede comprobar comparando la gráfica de la fig. 6.23 con la gráfica de la fig. 6.7.

En la fig. 6.6.1 se muestra la gráfica del voltaje de salida del stack, se aprecia la respuesta dinámica a los escalones de corrientes impuestos por el tracking.

En la fig. 6.25 se muestra la corriente de salida del convertor DC-DC. Se ha diseñado el sistema para que esta corriente en régimen sea constante, con el objetivo de que este sub sistema sea visto por el VSI como una fuente de corriente constante.

En la fig. 6.27 se grafican las potencias instantáneas en la entrada y en la salida del convertor DC-DC. Observar como en $t = 1\text{seg}$, tanto la corriente de salida como la potencia entregada, tienen un escalón negativo, mostrando que el tracking se pasó del punto de máxima potencia, rectificándolo y convergiendo en el paso siguiente.

El sub sistema simulado cumple las especificaciones de diseño.

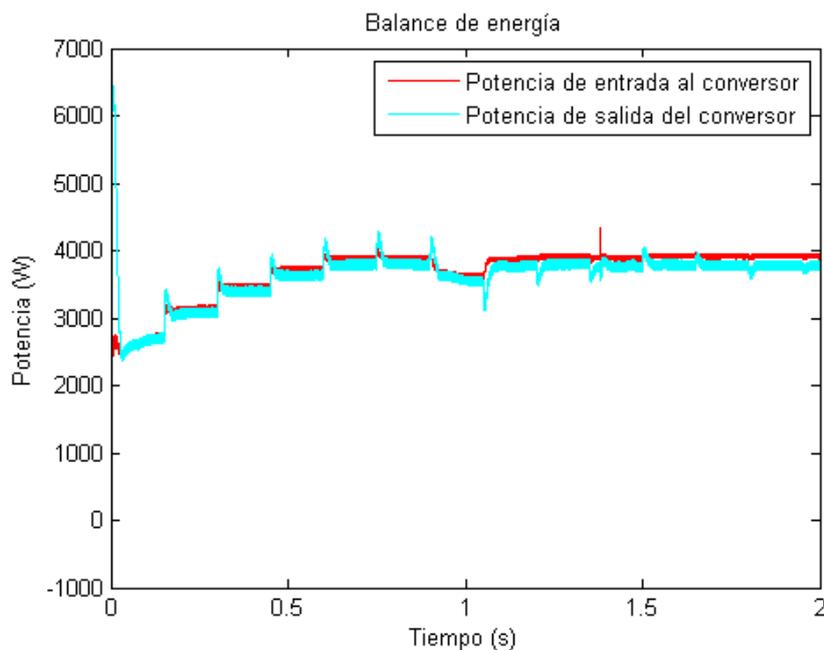


Figura 6.27: Balance de potencia del sistema.

6.6.2. Resultados de la simulación con el stack MPC

En la fig. 6.6.2 se muestra la corriente de salida del stack MPC junto con la corriente I_{ref} , calculada por el control de tracking. No es necesario en esta simulación mostrar la temperatura porque se recuerda que la linealización para el MPC se obtuvo

a temperatura constante (318 K).

En la gráfica de la fig. 6.6.2 se puede apreciar cómo el algoritmo de tracking converge en el punto de máxima potencia en 130 A, este resultado es consistente con la imagen de la fig. 6.14 en donde se puede apreciar el punto de 130 A.

En la fig. 6.28 se muestra la gráfica del voltaje de salida del stack, se aprecia la respuesta dinámica a los escalones de corrientes impuestos por el tracking.

En la fig. 6.6.2 se muestra la corriente de salida del convertor DC-DC. Se cumple con el objetivo de diseño para que esta corriente en régimen sea constante.

En la fig. 6.30 se grafican las potencias instantáneas en la entrada y en la salida del convertor DC-DC.

El sub sistema simulado cumple las especificaciones de diseño.

Finalmente, se observa que la evolución del sub sistema de la fig.6.22 utilizando el stack SR_H y la evolución del mismo utilizando el stack MPC presentan el mismo comportamiento en términos globales. Siendo esto así en 7 se realizan las simulaciones del sistema completo utilizando el MPC con el fin de reducir el esfuerzo de computo y por ende el tiempo de simulación y obteniéndose un correcto comportamiento global del sistema comparado con el que se obtendría de usar el SR_H .

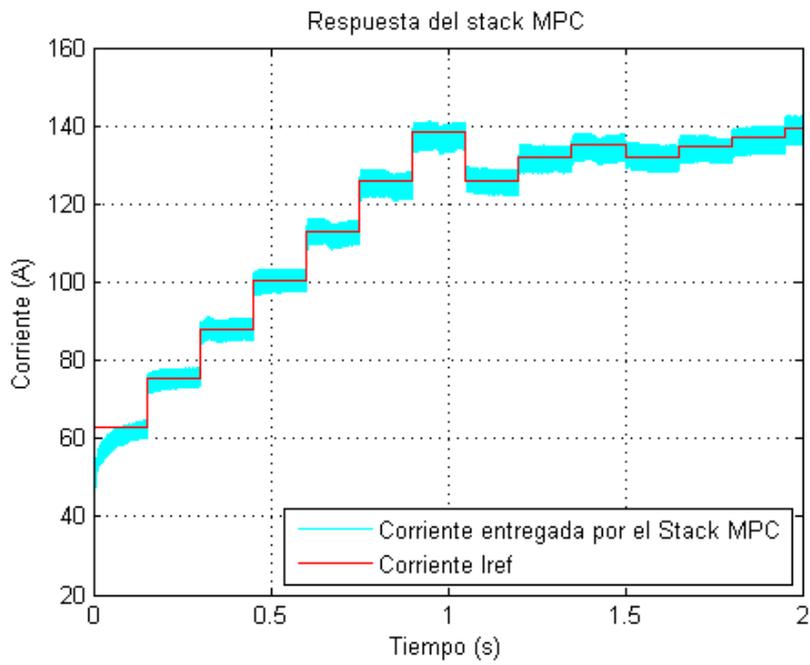


Figura 6.28: Corriente de salida del stack bajo el efecto del tracking.

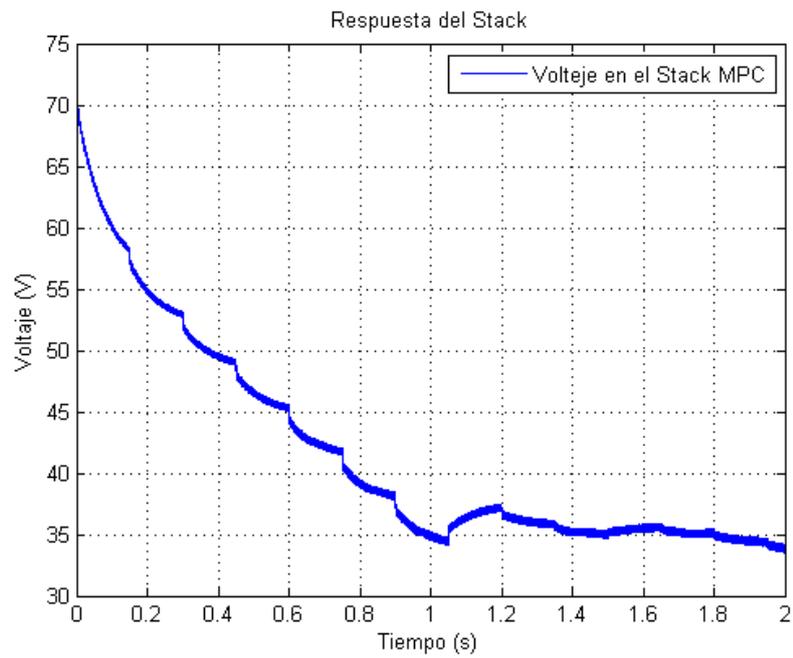


Figura 6.29: Voltaje de salida del stack.

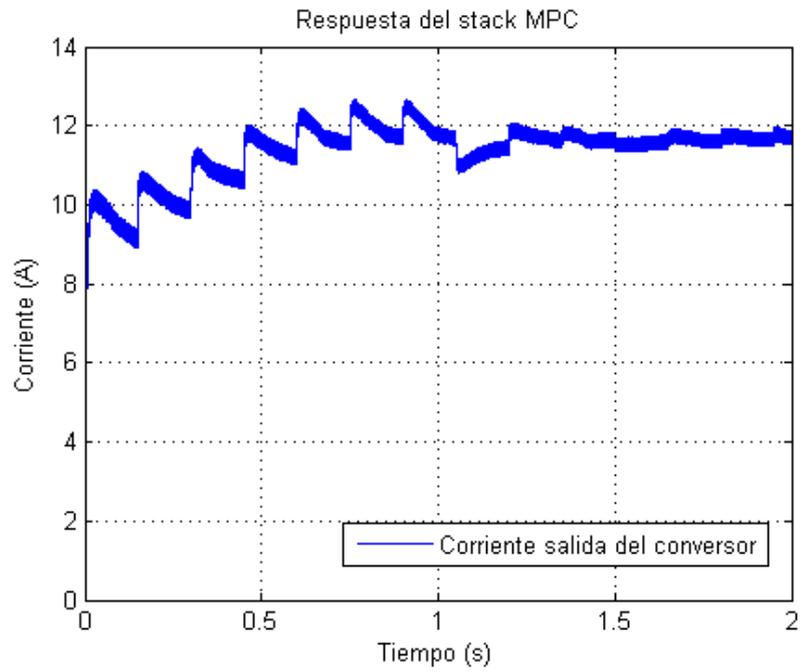


Figura 6.30: Corriente de salida del convertor DC-DC.

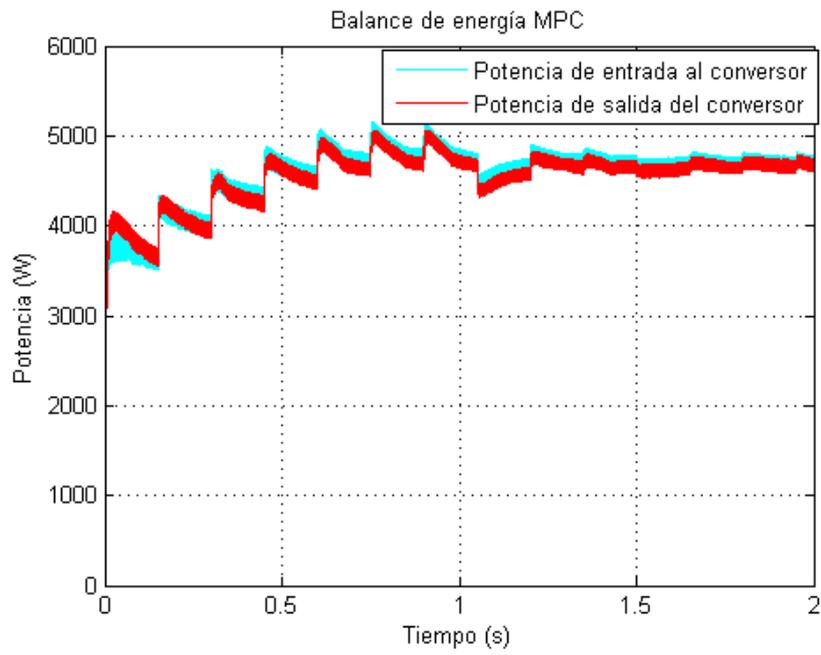


Figura 6.31: Balance de potencia del sistema.

7.1. Introducción

En este capítulo se presentan las simulaciones realizadas en Matlab/Simulink del sistema propuesto de generación distribuida con CdeC. A partir de las mismas se validará el diseño del convertor DC-DC realizado en el capítulo 6. Así mismo se muestra el comportamiento del sistema frente a fallas de la Celda y perturbaciones en la red eléctrica.

7.2. Simulación en condiciones normales

7.2.1. Sistema simulado

En la fig. 7.1 se presenta el diagrama de la topología de conexión a la red utilizando CdeC. Su implementación en Simulink se muestra en la fig. A.17 del apéndice.

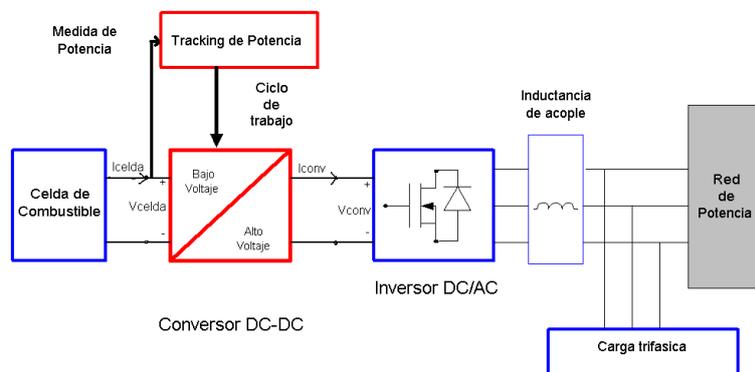


Figura 7.1: Diagrama de bloques de la topología de enlace con la red eléctrica.

El stack de celdas utilizado, al cual solo llamaremos “celda”, está compuesto por 72 celdas, con una potencia nominal total de 4200 Watts. Se utiliza el convertor DC-DC diseñado en el capítulo 6, y el VSI¹ diseñado por [24].

En esta simulación se observa la evolución del sistema desde el reposo hasta que alcanza el régimen y su comportamiento en el mismo. Para reducir los tiempos de cálculo numérico, se utilizó para la misma, el modelo parámetros constantes detallado en el capítulo 6. Por el mismo motivo se utilizó una frecuencia de portadora de 1kHz, en lugar de 10kHz, en el bloque de generación de pulsos PWM.

El echo de usar una frecuencia de reloj 1 KHz y el modelo de parámetros constantes introduce cierto error en los datos obtenidos de la simulaciones. Sin embargo esto no afecta el comportamiento global del sistema como se muestra en el apartado 6.6 y permite ahorrar tiempo de computo en cada simulación.

7.2.2. Entrada al convertor DC-DC

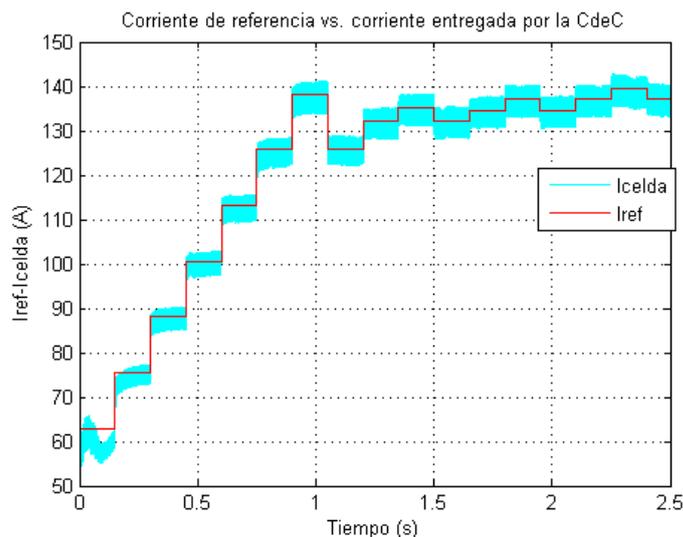


Figura 7.2: Corriente de referencia vs. corriente entregada por la CdeC.

En la fig. 7.2 se muestra el funcionamiento del control de corriente diseñado en el capítulo 6. La corriente I_{ref} es el nivel de referencia impuesto por el bloque de tracking de potencia, ver fig. A.10 del apéndice. Mientras que I_{celda} es la corriente entregada por la celda. En la fig. 7.3 se muestra cómo el algoritmo de tracking ajusta el valor de I_{ref} para maximizar la potencia de la celda. Por otro lado se puede observar como el algoritmo de tracking reduce el paso una vez alcanzado el régimen. Un aspecto interesante a señalar es que el sistema alcanza el régimen en un tiempo del orden de 1 segundo.

¹Se utiliza una frecuencia de 5kHz para el control de corriente del VSI, una inductancia de acople de 20mH, tensión de referencia para el bus de continua de 415V y tensión de red de 220V.

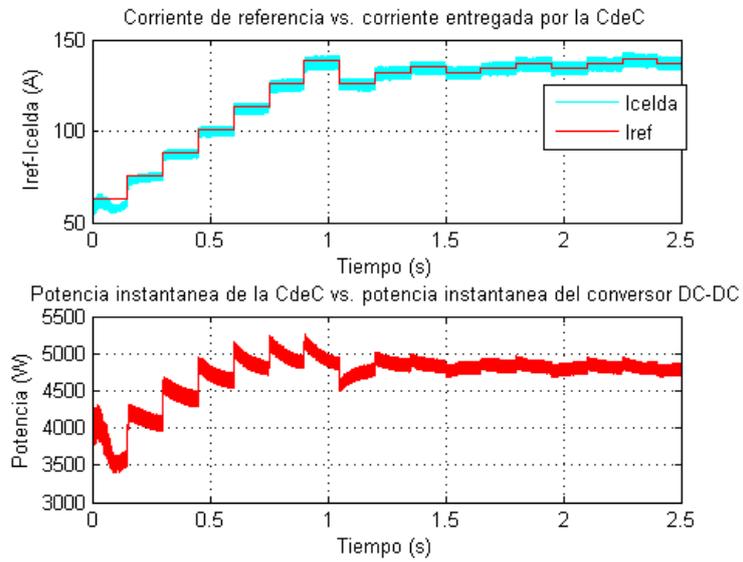


Figura 7.3: Corriente y potencia entregadas por la CdeC.

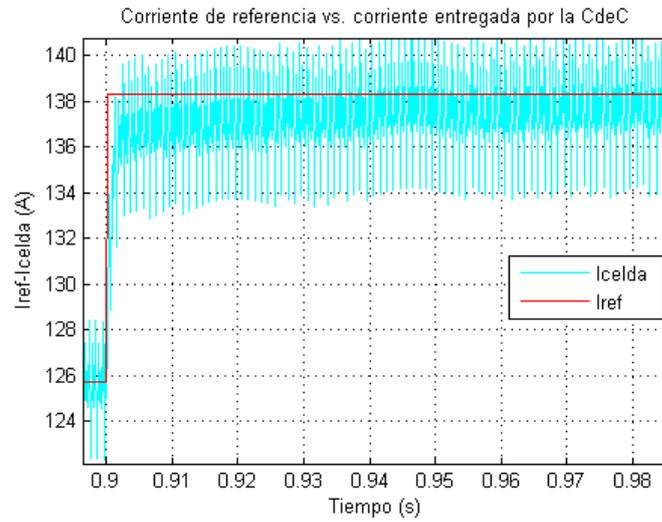


Figura 7.4: Imagen ampliada de corriente de referencia vs. corriente entregada por la CdeC.

La fig. 7.4 es una ampliación de la fig. 7.2. En ella se observa la respuesta de la corriente I_{celda} , frente a un escalón en I_{ref} . También se puede apreciar el ripple de I_{celda} , el cual es menor a 6%. Este resultado es coherente con el diseño efectuado en el capítulo 6, ya que en la simulación se utiliza una frecuencia de 1kHz en vez de 10kHz.

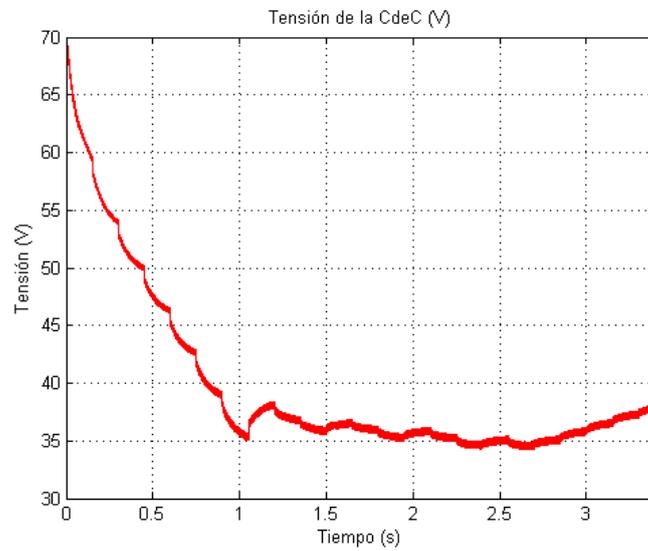


Figura 7.5: Tensión en bornes de la CdeC.

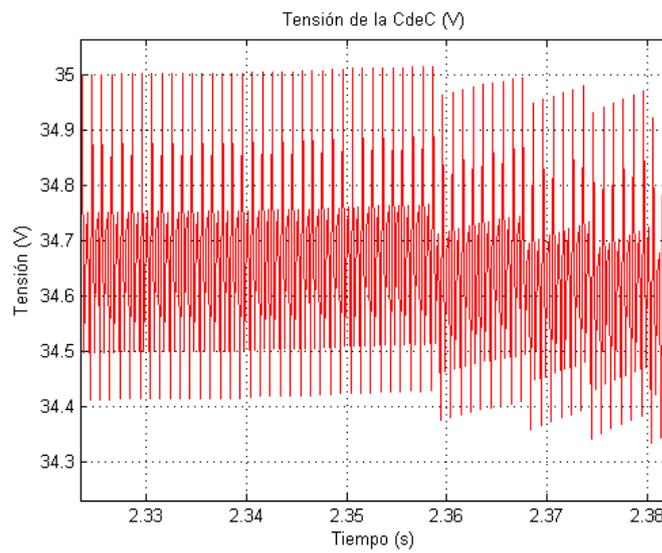


Figura 7.6: Imagen ampliada de la tensión en bornes de la CdeC.

En la fig. 7.5 se observa la evolución de la tensión en bornes de la celda, mientras que en la fig. 7.6 se puede observar el ripple de tensión. El mismo es inferior a 2%.

7.2.3. Salida del convertor DC-DC

En la fig. 7.7 se muestra la evolución de la corriente de salida. Se observa que luego de un pico inicial, la corriente alcanza valores estables en un tiempo del orden de 200ms. Este pico se produce durante la carga del capacitor de entrada al VSI. Esto último se puede apreciar en la fig. 7.8, en donde se observa como aumenta la tensión en la salida del convertor DC-DC, durante ese intervalo de tiempo.

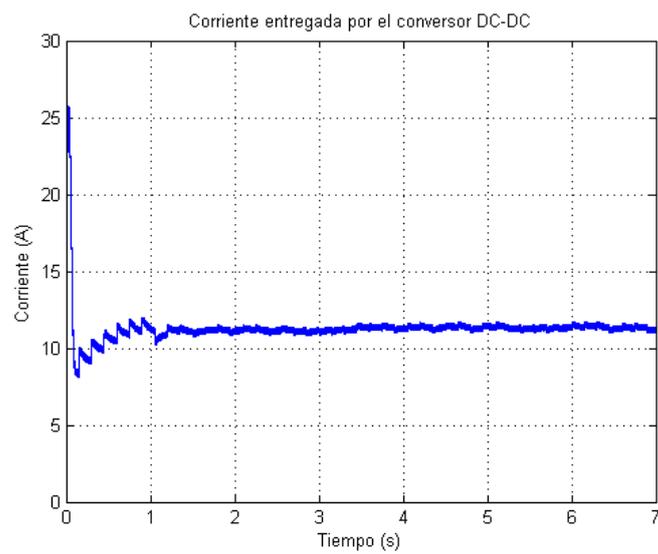


Figura 7.7: Corriente a la salida del convertor DC-DC.

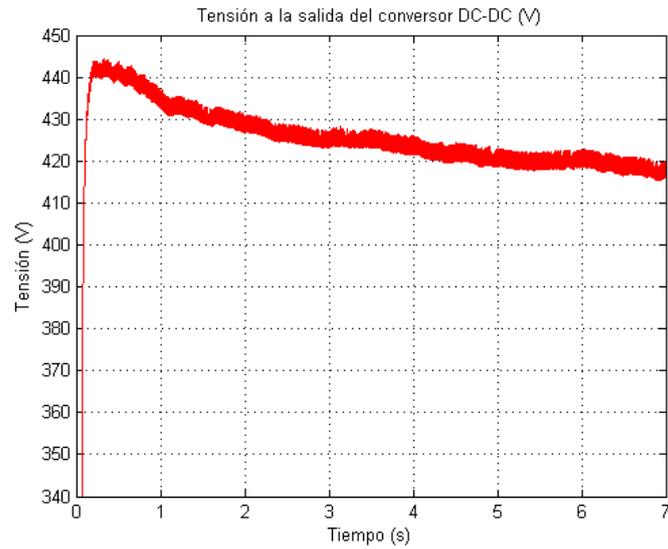


Figura 7.8: Tensión a la salida del convertidor DC-DC. Observar que la dinámica de control demora por lo menos 4 segundos en asentarse en su valor de régimen.

En las figs. 7.9 y 7.10 se observan los ripples de la corriente y la tensión a la salida del convertidor DC-DC, las cuales son menores a 4 % y 1 % respectivamente. Este resultado es coherente con el diseño efectuado en el capítulo 6, donde se exige 1 % de ripple para la corriente para una frecuencia de 10kHz, mientras que en la simulación se utiliza una frecuencia de 1kHz.

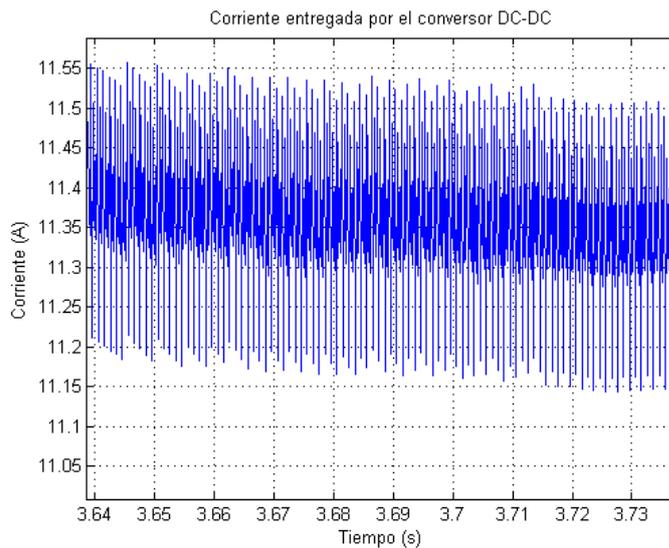


Figura 7.9: Imagen ampliada de la corriente entregada por el convertidor DC-DC.

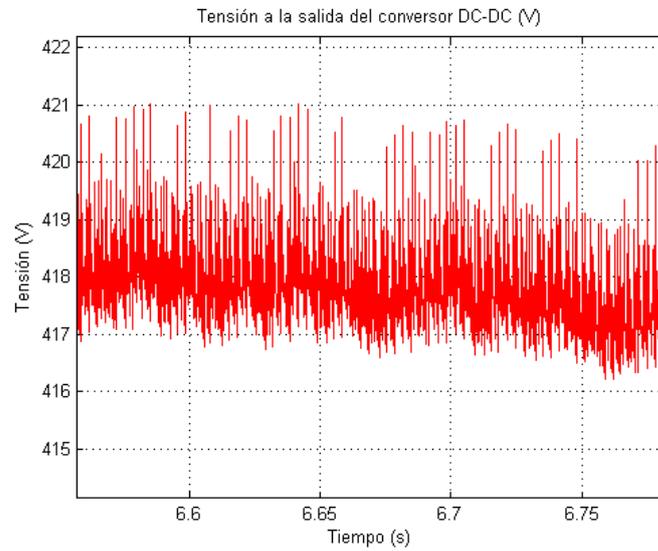


Figura 7.10: Imagen ampliada de la tensión a la salida del convertor DC-DC.

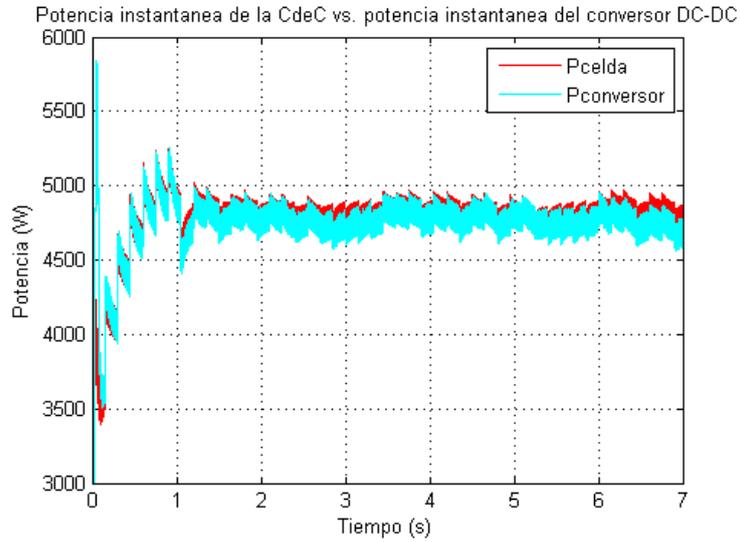


Figura 7.11: Potencia instantánea entregada por la Celda y potencia instantánea entregada por el convertor DC-DC.

En la fig. 7.11 se muestran las potencias instantáneas entregadas por la celda y por el convertor DC-DC.

7.2.4. Salida del VSI

En las figs. 7.12 y 7.13, se muestran la corriente y la potencia entregada por el VSI a la red eléctrica. Como se puede observar estos resultados son muy similares a los obtenidos en [24].

Por último la fig. 7.14, muestra la descomposición en armónicos de la corriente entregada a la red eléctrica.

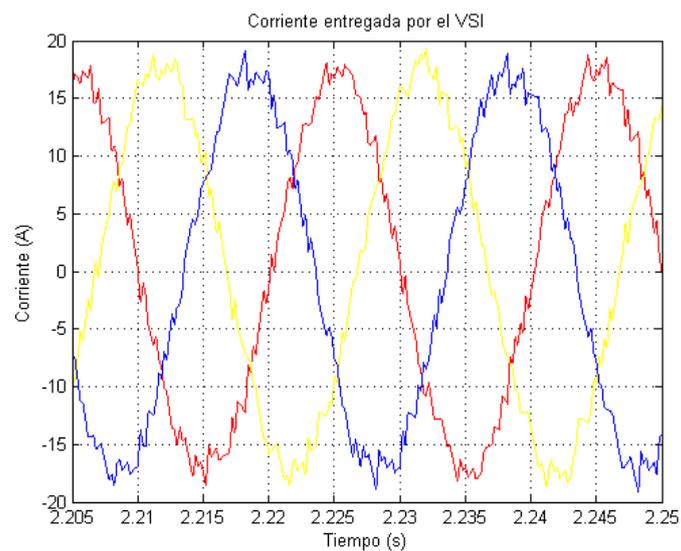


Figura 7.12: Corriente entregada por el VSI a la red eléctrica.

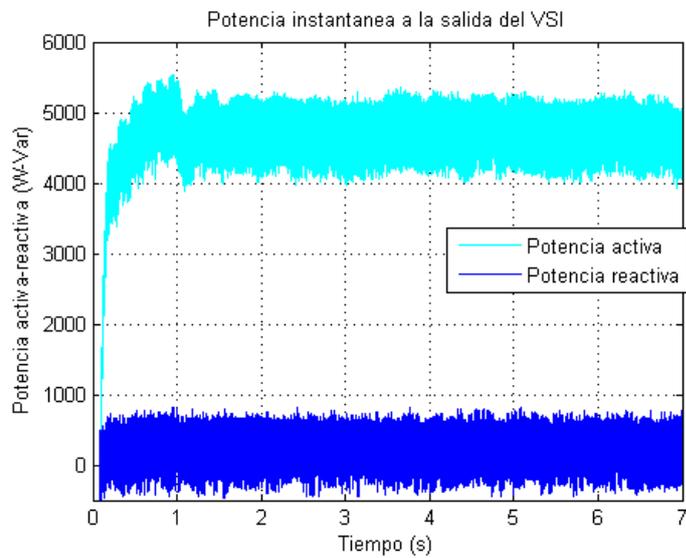


Figura 7.13: Potencia entregada por el VSI a la red eléctrica.

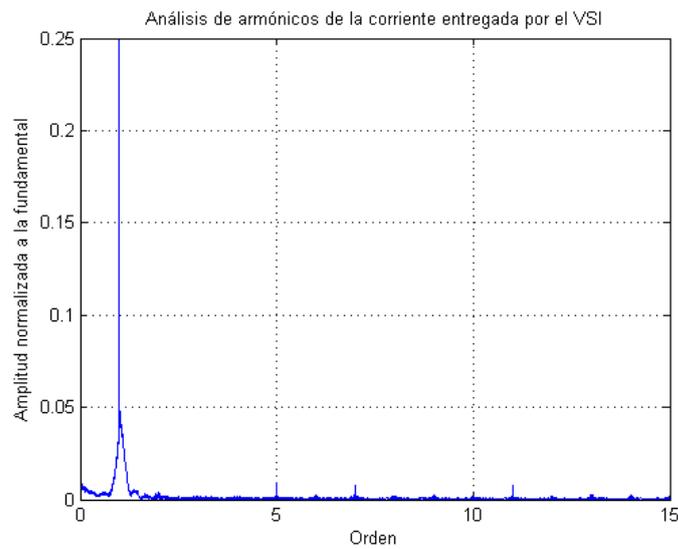


Figura 7.14: Análisis de armónicos de la corriente entregada por el VSI.

7.3. Comportamiento del sistema frente a problemas en la celda

En esta sección se muestra el comportamiento del sistema frente a fallas en la celda. En particular se presentan dos escenarios diferentes:

- Corte de alimentación desde la celda, el cual puede ser provocado por falla de algún conductor, o debido a la acción de alguna protección.
- Caída brusca en la tensión de la celda. Esto puede ser provocado por alguna deficiencia en la alimentación de los combustibles.

7.3.1. Interrupción de alimentación desde la Celda

En esta simulación se realiza una interrupción en la alimentación del convertor DC-DC.

En las figs. 7.15 y 7.16 se aprecia el momento de la interrupción y la respuesta del tracking a la misma. Esta resulta ser lenta en su retorno a cero ya que el del tracking ya había reducido el paso.

En la fig. 7.17 se muestra la descarga del capacitor en la entrada del convertor DC-DC.

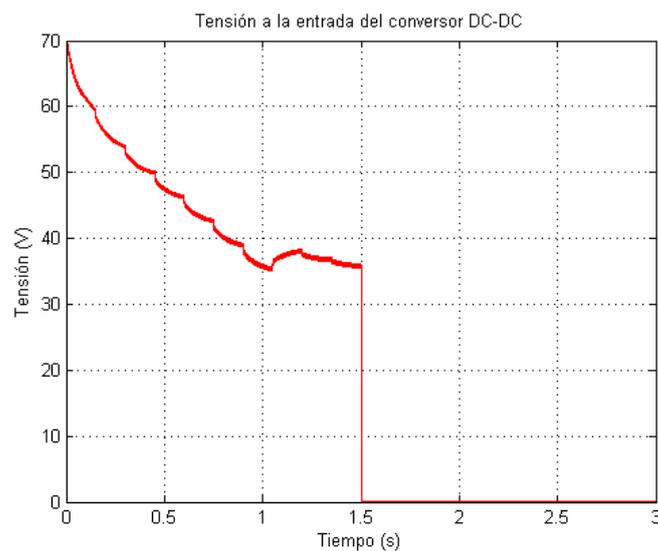


Figura 7.15: Tensión a la entrada del convertor DC-DC.

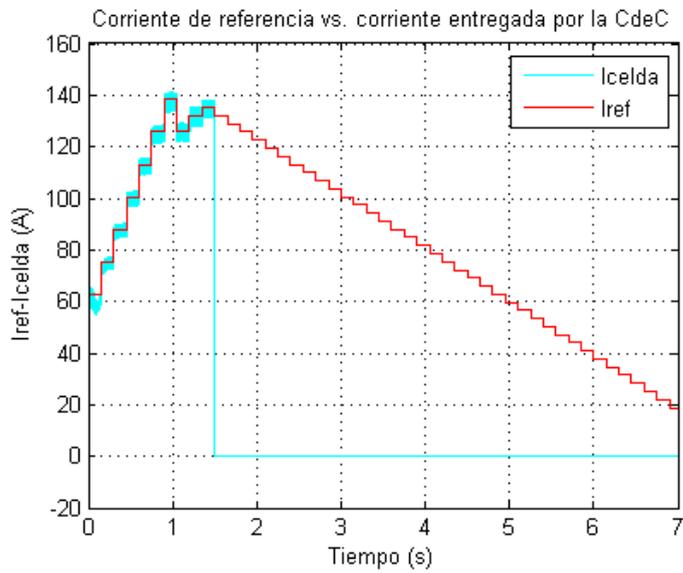


Figura 7.16: Corriente de referencia vs. corriente entregada por la celda.

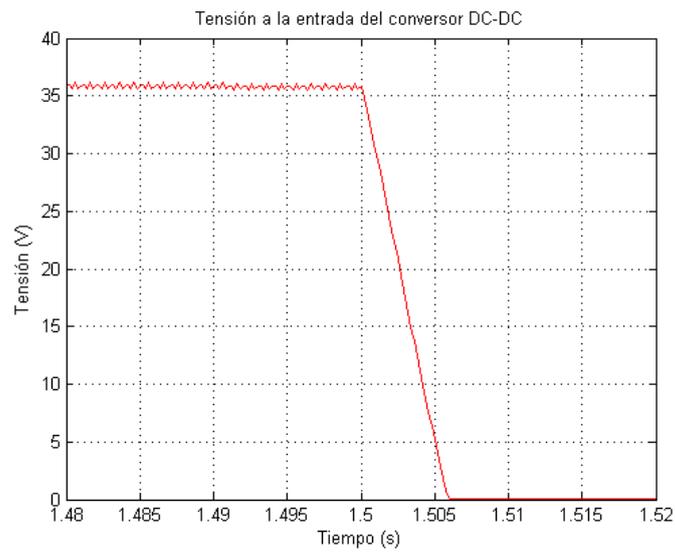


Figura 7.17: Imagen ampliada de la tensión a la entrada del convertor DC-DC. En la misma se aprecia la descarga del capacitor de entrada.

En la fig. 7.18 se muestra la respuesta del control del VSI. En la misma se aprecia una caída luego de la interrupción y su posterior recuperación. Esta es la respuesta del control de tensión del VSI a un escalón negativo de corriente en su alimentación [24].

En la fig. 7.19 se aprecia un pico de corriente en el instante posterior a la interrupción. Este comportamiento se debe a la saturación del control PWM (ver fig. 7.20), el cual aumenta al máximo el ciclo de trabajo de las llaves del convertor DC-DC, provocando un aumento en el valor medio de la corriente, que se mantiene hasta la descarga del capacitor. Luego sigue la descarga de la bobina del filtro del convertor DC-DC.

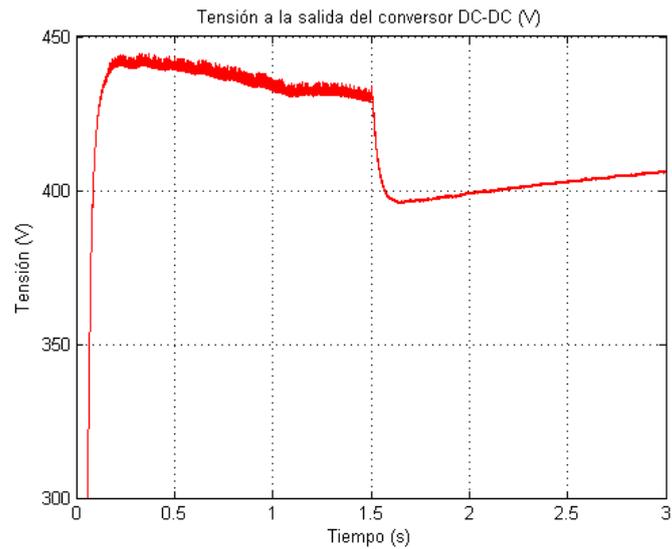


Figura 7.18: Tensión a la salida del convertor DC-DC.

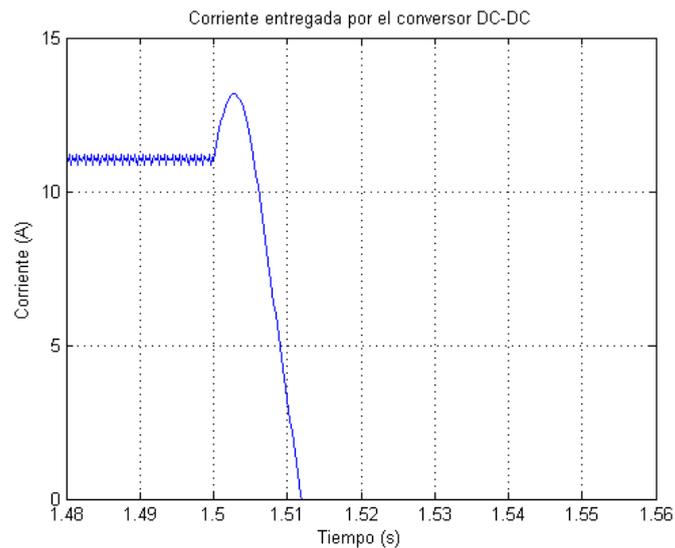


Figura 7.19: Corriente entregada por el convertor DC-DC.

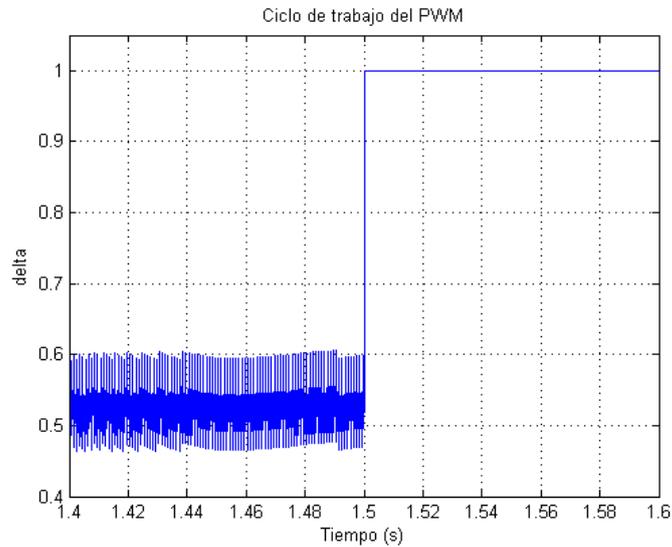


Figura 7.20: Ciclo de trabajo del PWM. Se observa como el mismo satura al interrumpirse la corriente desde la CdeC.

7.3.2. Caídas de tensión en la celda

En esta simulación se estudia el comportamiento del sistema frente una caída en la tensión de la celda. Esta caída es implementada con una resistencia de $100m\Omega$ en serie con la celda, la cual comienza a actuar luego de que el sistema alcanza el régimen.

En las figs. 7.21 y 7.22, se puede observar la tensión y la corriente respectivamente, a la entrada del convertor DC-DC. En la fig. 7.23 se puede apreciar como este último se recupera de la caída de potencia, y corrige la corriente solicitada a la celda, con el criterio de maximizar la potencia.

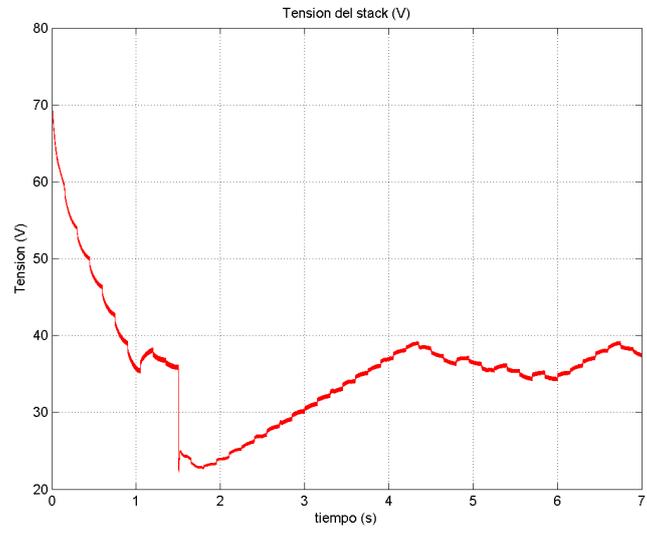


Figura 7.21: Tensión a la entrada del convertor DC-DC.

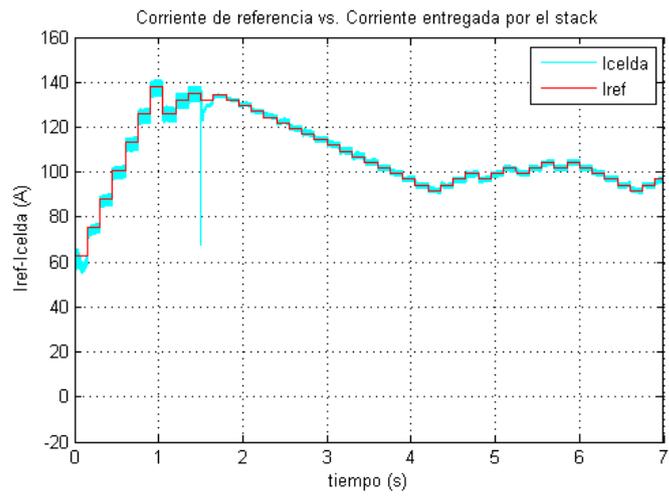


Figura 7.22: Corriente entregada por la celda y corriente de referencia.

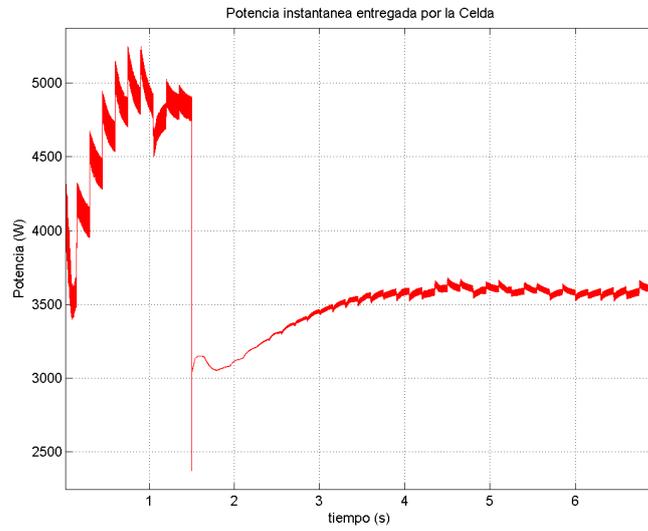


Figura 7.23: Potencia entregada por la celda.

En las figs. 7.24 y 7.25 se muestra la salida del convertor DC-DC. Se puede apreciar como la tensión de régimen no se ve alterada con respecto a la tensión en correcto funcionamiento de la celda. En cuanto a la corriente, si bien su valor es menor, también alcanza un valor estable, lo cual muestra el correcto funcionamiento del control de corriente.

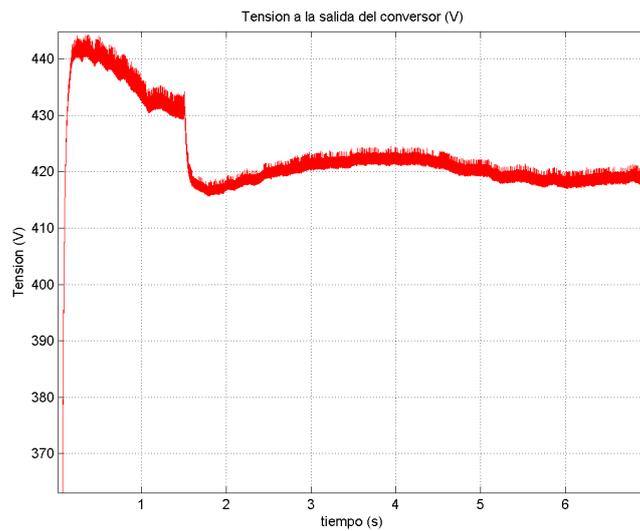


Figura 7.24: Tensión a la salida del convertor DC-DC.

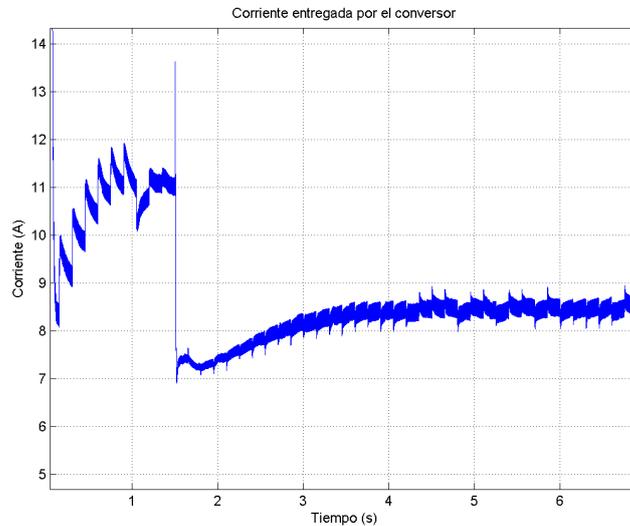


Figura 7.25: Corriente entregada por el convertor DC-DC.

7.4. Comportamiento del sistema frente a perturbaciones en la red eléctrica

En esta sección se muestra el comportamiento del sistema frente a las principales perturbaciones que presentan las redes eléctricas. Se presta especial importancia a la corrientes entregadas por el VSI y el convertor DC-DC. Las perturbaciones de la red estudiadas son:

- Armónicos.
se introducen a la red eléctrica armónicos de orden 5 y 7.
- Huecos.
Se introducen huecos en la tensión de red a regulares.
- Flicker.
Se introduce una señal sinusoidal de 8Hz de frecuencia en la red.
- Desbalances.
Se introducen desbalances de amplitud en la tensión de red.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones para cada una de las situaciones arriba mencionadas.

7.4.1. Red con armónicos

En esta simulación se introdujo en la red armónicos de orden 5 y 7, de relación de amplitud con respecto a la fundamental 0.2 y 0.1, respectivamente. En la fig. 7.26 se observa la tensión de la red con armónicos, mientras que en la fig. 7.27 se observa la corriente entregada por el VSI.

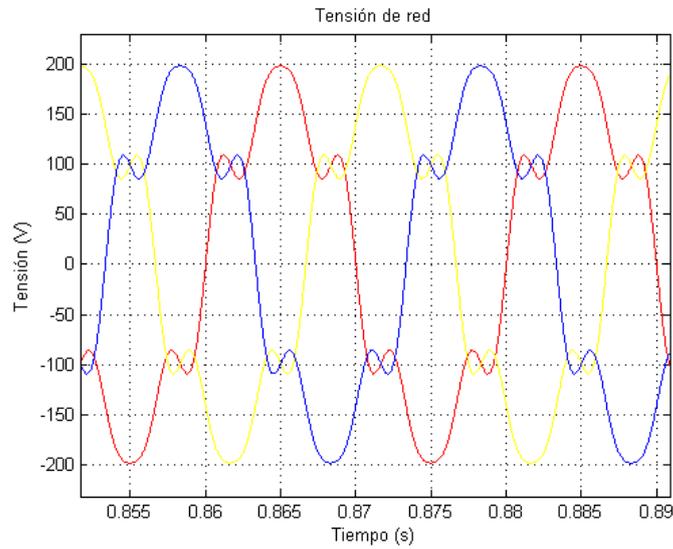


Figura 7.26: Tensión de la red eléctrica con armónicos.

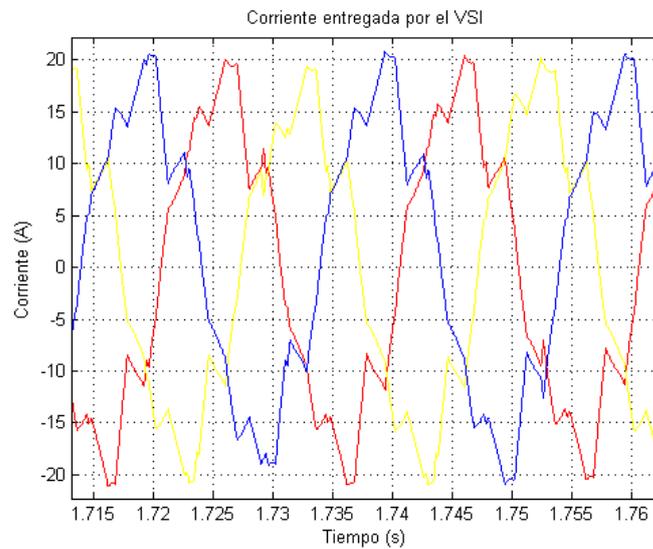


Figura 7.27: Corriente entregada por el VSI a la red eléctrica.

En la fig. 7.28 se muestra el contenido armónico de la tensión de red y de la corriente entregada por el VSI. Se observa claramente que el contenido armónico de la corriente entregada a la red es similar al contenido armónico de la red eléctrica. Esto se debe a que el control de corriente del VSI utiliza como referencia la tensión de la red [24].

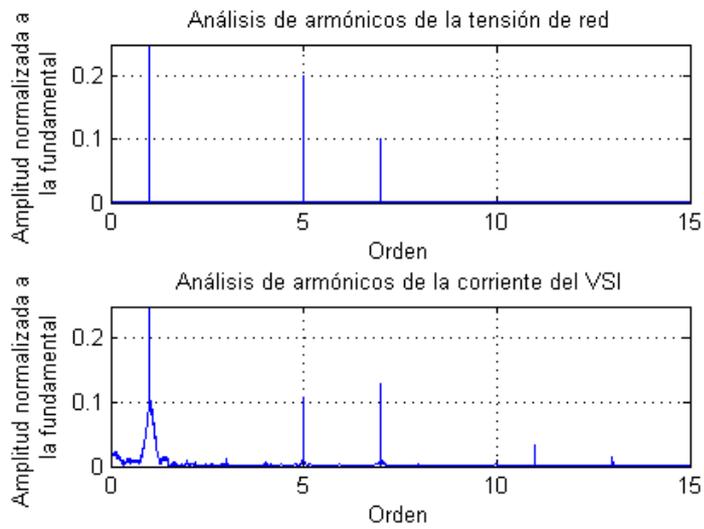


Figura 7.28: Análisis de armónicos de la tensión de red y de la corriente entregada por el VSI.

En la fig. 7.29, se muestra la corriente entregada por el convertor DC-DC. Se puede apreciar que es idéntica a la corriente de la fig. 7.7.

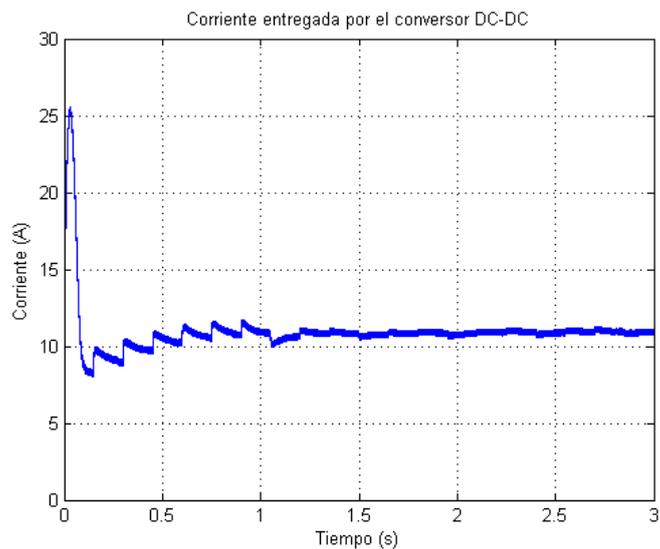


Figura 7.29: Corriente entregada por el convertor DC-DC. La misma no se ve afectada por los armónicos introducidos en la red.

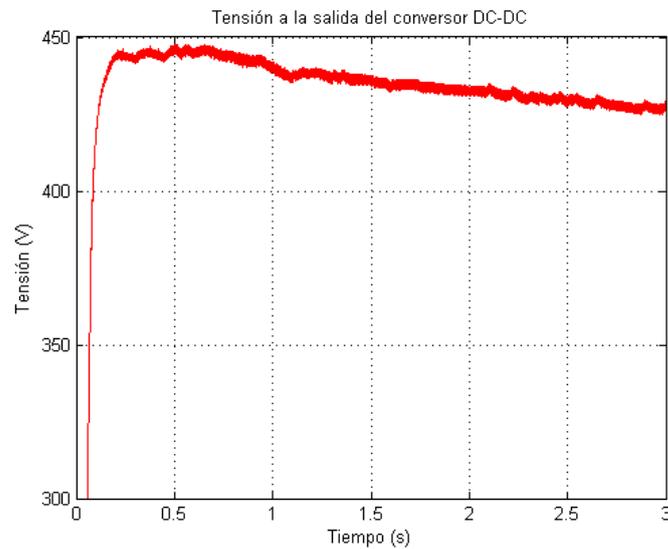


Figura 7.30: Tensión a la salida del convertor DC-DC. La misma no se ve afectada por los armónicos introducidos en la red.

Las figs. 7.29 y 7.30 muestran que los controles de corriente del convertor DC-DC y de tensión del VSI no se ven afectados por los armónicos que se introducen en la red eléctrica.

7.4.2. Red con huecos, flicker o desbalances

En las figs. 7.31, 7.32 y 7.33 se observa la red afectada con huecos², flicker³ y desbalances⁴, respectivamente.

²Tensión de red afectada por un factor de 0.5, durante 26ms

³Señal de 8Hz y de amplitud $\frac{1}{10}$ de la amplitud de la tensión de red, superpuesta a esta última.

⁴Tensión de red afectada por un factor de 0.8, 1 y 1.2 en cada una de las fases

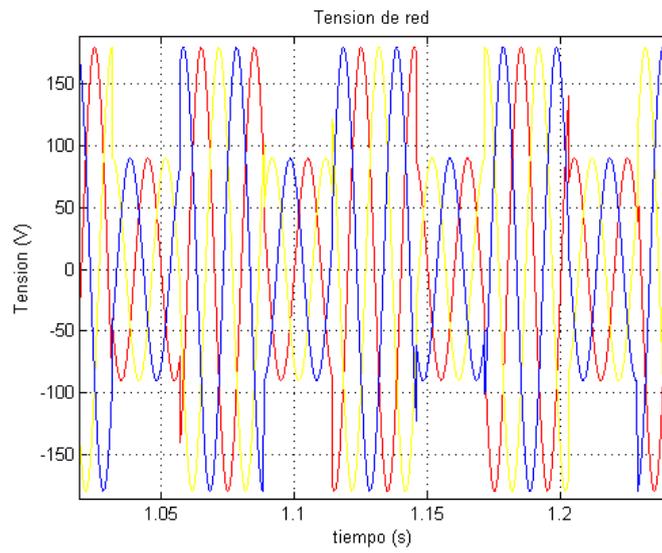


Figura 7.31: Tensión de la red eléctrica con huecos.

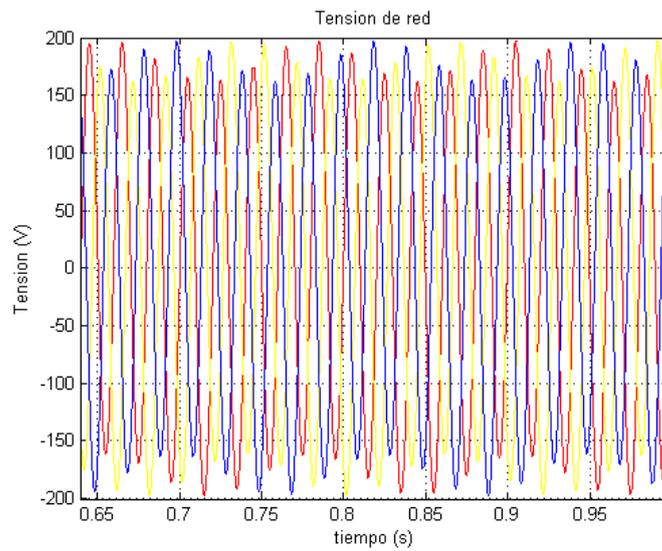


Figura 7.32: Tensión de la red eléctrica con flicker.

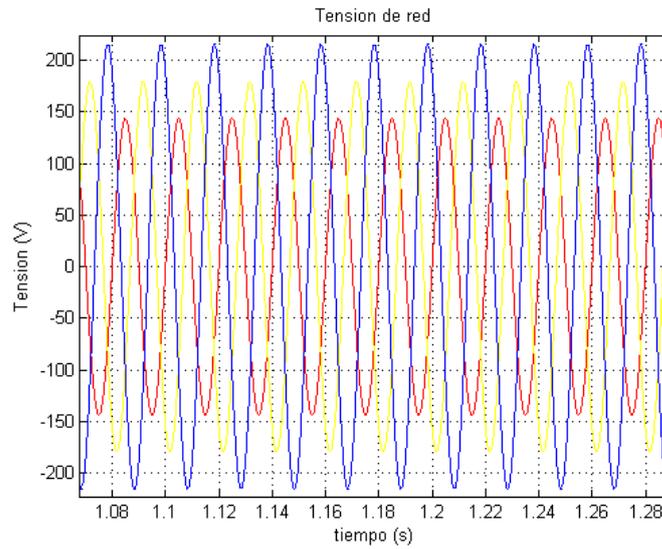


Figura 7.33: Tensión de la red eléctrica con desbalances.

En las figs. 7.34, 7.35 y 7.36, se observa la corriente entregada por el VSI a la red para cada uno de los casos. En las tres situaciones los valores instantáneos de dicha corriente tienen un comportamiento inverso al valor instantáneo de tensión de red.

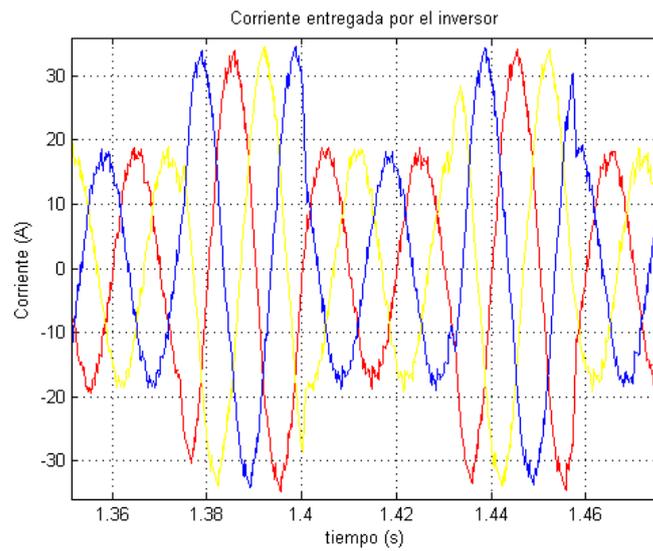


Figura 7.34: Corriente entregada por el VSI, conectado a una red con huecos.

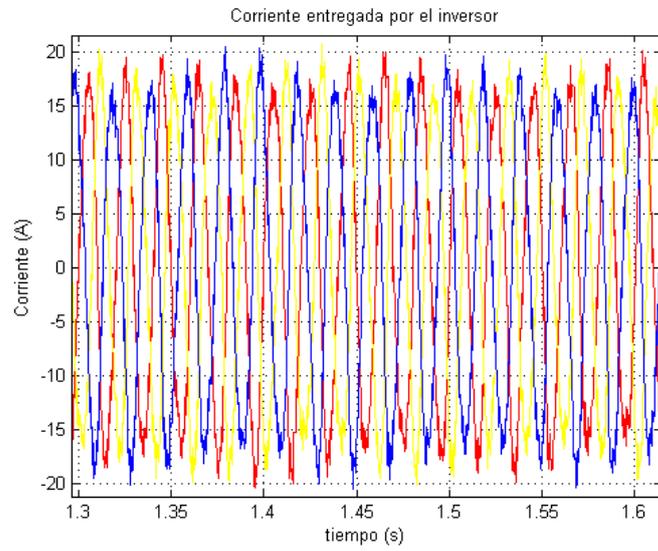


Figura 7.35: Corriente entregada por el VSI, conectado a una red con flicker.

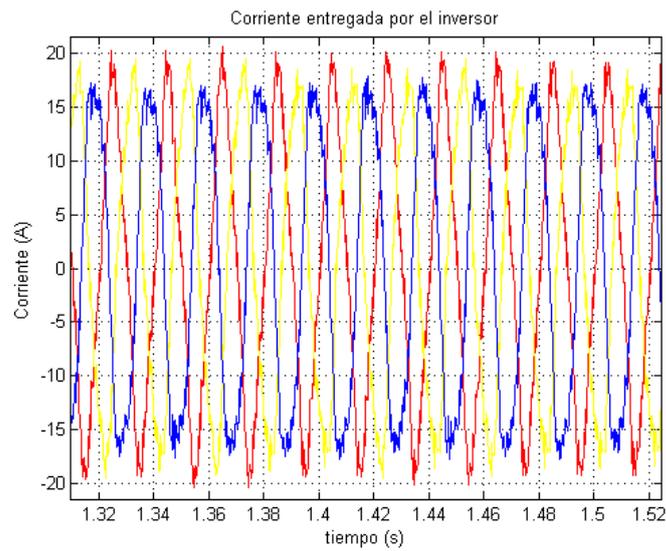


Figura 7.36: Corriente entregada por el VSI, conectado a una red con desbalances.

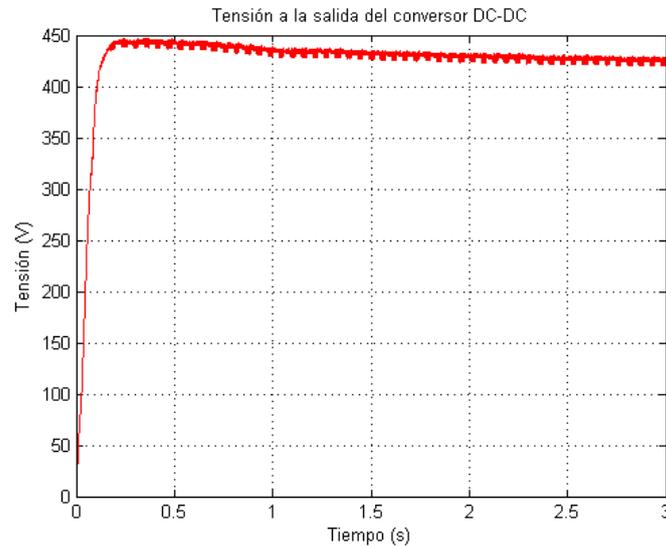


Figura 7.37: Tensión a la entrada del VSI, conectado a la red con huecos. El ripple obtenido es menor a 2 %.

En ninguno de estos casos ni la corriente entregada, ni la tensión a la salida del convertor DC-DC, se ven alteradas por estas perturbaciones en la red.

7.5. Conclusiones

Se logró integrar exitosamente en las simulaciones dos estrategias de control de dos convertidores distintos, desarrollados en forma independiente por dos grupos de trabajo.

Las simulaciones realizadas volcaron los siguientes resultados:

- correcto funcionamiento del tracking de potencia, tanto en la ubicación del punto de máxima potencia, como en la posterior reducción del paso.
- rápida respuesta de la corriente entregada por la CdeC frente a escalones de la corriente solicitada por el tracking.
- bajos niveles de ripple de tensiones y corrientes, en la entrada y la salida del convertor dc-dc.
- valor estable de la corriente entregada al VSI.

Los resultados obtenidos se ajustan a los criterios de diseño de los capítulos anteriores.

Por otro lado se comprobó que el sistema es robusto frente a fallas en la celda y perturbaciones en la red eléctrica. Particularmente para el caso de interrupción de alimentación desde la celda, los controles de corriente del convertor DC-DC y el control

de tensión del VSI, evitan que se generen sobrecorrientes y sobretensiones. En el caso de pérdida de potencia entregada por la celda, se destaca el correcto funcionamiento del tracking, el cual corrige la corriente solicitada con el objeto de maximizar la potencia.

Los controles de corriente del convertidor DC-DC y de tensión del VSI son inmunes a perturbaciones en red eléctrica. En esta situación el control de corriente del VSI introduce armónicos en la corriente que inyecta a la red [24]. Esto se podría mejorar con la utilización de un PLL para generar la señal de referencia para el control de corriente del VSI.

Panorama de los costos para la generación de energía con CdeC

8.1. Introducción

En este capítulo se analiza el aspecto económico de la generación de energía con CdeC. Se introduce al lector a las topologías de cogeneración utilizadas para lograr mejorar la eficiencia de las CdeC. Finalmente se plantea una situación con dos escenarios en donde se estima el costo de producir energía usando un stack comercial.

8.2. Celdas de Combustible en la generación de Potencia estacionaria

Con hidrógeno se puede alimentar motores de explosión o CdeC. En el primer caso bajan las emisiones de gases de efecto invernadero. En el segundo se genera electricidad que bien puede ser utilizada directamente en motores eléctricos o en instalaciones eléctricas convencionales, en esta segunda aplicación es posible aumentar el rendimiento por medio de la co generación hasta 70 %.

Por sus altas densidades de corriente la principal aplicación a las cual se destinan las celdas de combustible de membrana es al transporte, el mayor número de experiencias con estas celdas se han realizado en vehículos, por ejemplo en la fig. 8.1 se muestran prototipos potenciados algunos de ellos por PEMFC.



Figura 8.1: Prototipos de vehículos con CdeC, [19].

Con la baja de costos que traiga aparejado el uso a gran escala de CdeC en el transporte se espera que otras aplicaciones obtengan un beneficio de estas caídas de precios. Entre las aplicaciones beneficiarias se incluye la generación de potencia estacionaria, [7].

En general para potencias mayores a 250 kW se utilizan celdas MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) SOFC (Solid oxide Fuel Cell), estas son consideradas celdas para generar potencia estacionaria a gran escala. Se les cataloga como celdas de alta temperatura (mayores a 600 °C) lo que aumenta su eficiencia en más de un 50 %.

Las PEMFC operan en temperaturas de entre 50°C a 100°C y con potencias de hasta 250 kW, esto las convierte en ideales para el consumo residencial.

Una forma eficiente de aprovechar la potencialidad de las CdeC es en sistemas combinados de calor y potencia.

8.2.1. Generación combinada de calor y potencia con PEMFC

La Generación combinada de Calor y Potencia (G.C.C.P) consiste en utilizar la celda como fuente de energía eléctrica y de calor. La energía térmica de la celda se utiliza para calentar un fluido, en general agua en un ciclo de vapor.

En la imagen de la fig. 8.2 se muestra el diagrama de proceso de un sistema doméstico el cual usa la PEMFC, desarrollado por Plug Power, GE Fuel Cell System y Joh Vaillant. Este sistema se alimenta de hidrógeno por medio de un reformador de gas natural, y calienta agua que luego puede entrar en el circuito doméstico de consumo generando así un ahorro de energía en base al calor disipado en la celda.

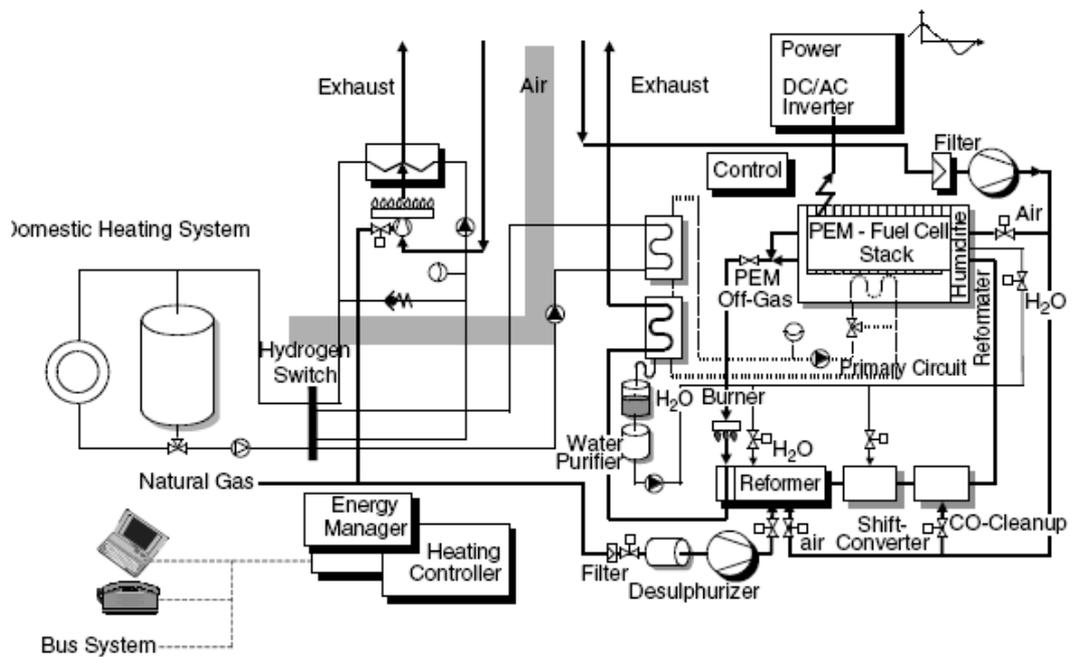


Figura 8.2: Sistema de cogeneración, [7].

Como en la fig 8.2 muchos sistemas domésticos de GCCP con CdeC obtienen el hidrógeno a partir del reformado de gas natural. Lo precios de estos sistemas oscilaban en EEUU entre USD 8.000 y USD 4000 en el año 2003 [7].

8.3. El Hidrógeno, vector de energía

El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo conocido, sin embargo no se encuentra en su estado natural.

El ser humano necesita procesarlo de otros materiales antes de poder utilizarlo. Este proceso de obtención del hidrógeno requiere que se gaste energía en el proceso que lo libera a su estado natural. La energía que se invierte en liberarlo es recuperada luego en un dispositivo de conversión de energía, por ejemplo una CdeC. El hidrógeno no es una fuente de energía sino que es un vector, entre la energía inicial que se invierte para liberarlo y la energía final que entrega al volver a su estado natural, [20]. Este concepto se ilustra en la 8.3

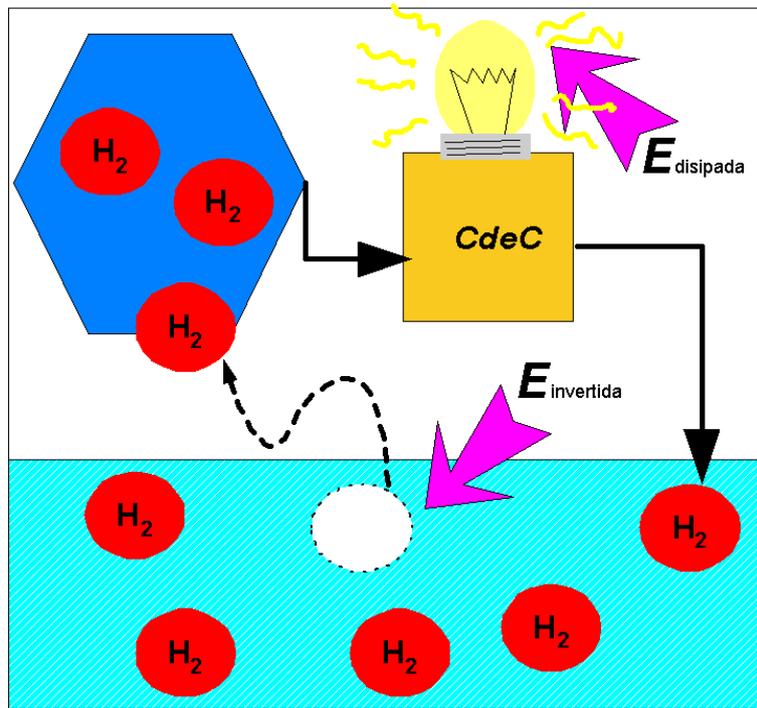


Figura 8.3: Potencial de Hidrogeno.

El generar energía en base a celdas de combustible requiere de una infraestructura para generar hidrógeno a bajo costo. En forma ideal esta infraestructura debería estar compuesta por las fuentes naturales; solar, eólica, biomasa etc. Por medio de estas se generaría hidrógeno el cual puede ser transportado a los centros de consumo por medio tanques o cañerías. Si este hidrógeno se consume en CdeC se genera electricidad y agua, la cual vuelve a la naturaleza y de la cual se puede volver extraer hidrógeno. A este ciclo se le denomina ciclo del hidrógeno y se observa en 8.4, constituye un ciclo cerrado de generación de energía en contraposición al ciclo de los combustibles fósiles el cual es abierto dado que no hay retorno de combustible a la naturaleza.

Algunos autores señalan que la expansión total del ciclo del hidrógeno llevaría a la humanidad a una nueva forma de economía descentralizada, denominada economía del hidrógeno, [11].

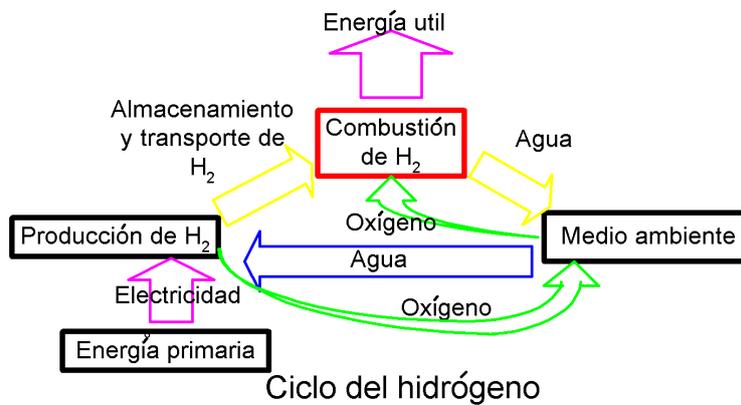


Figura 8.4: Ciclo de Hidrógeno.

8.3.1. Métodos de producción de hidrógeno

Los principales métodos de producción de hidrógeno son:

- reformado con hidrocarburos
- electrólisis del agua
- reformado de alcoholes

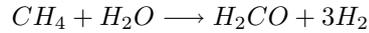
En la fig.8.5 se muestran una gráfica de la distribución de la producción de hidrógeno.



Figura 8.5: Producción de Hidrógeno, [16].

Reformado de hidrocarburos

El Reformado con hidrocarburos consiste en exponer a un gas natural, de alto contenido de metano, con vapor de agua a alta temperatura y presión.



Se obtienen como resultado de la reacción química; hidrógeno y dióxido de carbono, y dependiendo el compuesto reformado, también monóxido de carbono. Una vez realizada la reformación se debe realizar una limpieza del gas, cuando se precisa una gran pureza del hidrógeno, [21].

Este proceso tiene la desventaja que produce gases de efecto invernadero.

El reformado con gas natural es el método más eficiente y el más económico para la obtención de hidrógeno.

Electrólisis del agua

Es la reacción inversa a la que ocurre en la CdeC, a la molécula de agua se la somete a una corriente eléctrica disgregando así 1 átomo de hidrógeno y uno de oxígeno.



En la actualidad los investigadores trabajan en la creación de electrodos con materiales especiales de manera de poder aumentar la eficiencia del proceso, [20].

Reformado de alcoholes

En el reformado con vapor de alcoholes, (methanol ethanol) la mezcla líquida del alcohol y agua reacciona con un catalizador (Cu, Zn, Pt) para liberar los H_1 que componen la molécula. En el estado actual los esfuerzos de investigación se centran en mejorar la eficiencia de los catalizadoras.

8.3.2. Métodos de almacenar hidrógeno

Luego de que el hidrógeno fue liberado a su estado natural es necesario almacenarlo y trasladarlo a los centros de consumo. En la actualidad se utilizan tanques de acero que permiten almacenar hidrógeno comprimido a 200 bar, luego estos son trasladados a los centros de consumo, por ejemplo en camiones. En el sector industrial se ha resuelto el problema del transporte por medio de tuberías.

Se entiende que para el consumo de hidrógeno a gran escala se requiere desarrollo de la infraestructura para almacenarlo y transportarlo. El método de transporte queda fuertemente determinado por la manera en que el hidrógeno es almacenado. Entre los métodos para almacenar hidrógeno se destacan:

- Tanques reforzados
- Licuefacción del hidrógeno
- Hidruros metálicos

Tanques reforzados

El objetivo es que en el mismo volumen entre más cantidad de hidrógeno que en un tanque de los utilizados normalmente, atacando así la principal debilidad del hidrógeno que es su baja densidad energética volumétrica.

Se implementan tanques reforzados externamente con fibras de carbón los cuales permiten aumentar la cantidad de hidrógeno hasta 1 a 4 % del peso del recipiente, [20]. Otros tanques reforzados, también con fibras de carbón soportan presiones de hasta más de 450 bar, de esta manera aumenta la cantidad de hidrógeno en el mismo volumen de tanque, [20].

Licuefacción del hidrógeno

En este método también se ataca la baja densidad de energía volumétrica del gas hidrógeno, pero en vez de comprimirlo se lo somete a un proceso de licuefacción. Se logra así pasar por ejemplo de 0.6 kWh/l del hidrógeno comprimido a 170 bar a 2.4 kWh/l del hidrógeno líquido a -253 °C con 1 bar (casi 1 atmósfera), [20]. Cabe destacar que se ha utilizado este proceso en la industria aeroespacial.

Una gran desventaja de este método es que requiere de un sistema de almacenamiento a baja temperatura, todo este proceso de licuefacción y enfriamiento insume entre un 35 a 45 % del contenido energético del hidrógeno. Esto ha provocado que se investiguen nuevas procesos de licuefacción y nuevos materiales aislantes, [20].

Hidruros metálicos

La idea de este método es almacenar el hidrógeno en aleaciones metálicas en forma de hidruros. Por medio de variaciones de presión y temperatura es posible que ciertas aleaciones metálicas absorban hidrógeno, este proceso es reversible por lo cual también es posible desorber los átomos de hidrógeno contenidos en el aleación, [20].

Algunas aleaciones permiten acomodar más átomos de hidrógeno en el mismo volumen que el hidrógeno líquido, esto vuelve a este método particularmente interesante. Por ejemplo el hidruro $LaNi_5H_6$ tiene una densidad de energía volumétrica de 3.3 kWh/l mientras que la del hidrógeno líquido es, como se indicó anteriormente, 2.4 kWh/l, [20].

Las investigaciones se centran en obtener aleaciones con alta capacidad de absorber hidrógeno a temperatura y presión ambiente, también se busca catalizadores que aceleren la velocidad de la reacción de absorción desorción.

8.3.3. Costos de la producción de hidrógeno

En el cuadro 8.1 se muestran los costos de producir hidrógeno según la técnica que se aplique.

Fuente	U\$\$/GJ
Reformado de gas natural	7-11
Biomasa	10-18
Gasificación de carbón	8-11
Nuclear	15-20
Gasolina	6-8
H_2 electrolítico (u\$\$ 0.003/kWh)	11
H_2 electrolítico solar	27-47
H_2 electrolítico eólico	17-23

Cuadro 8.1: Costos de producir Hidrógeno, [20].

Esto nos da una idea de cuantos dólares se debe invertir por giga Joule para producir hidrógeno. Se observa que el reformado con gas y la obtención por combustibles fósiles son las alternativas que optimizan el beneficio

Los costos de producción mostrados en la tabla 8.1 no incluyen gastos de transporte y almacenamiento. Como una estimación de estos se debe sumar a los datos de 8.1 de 6-8 U\$\$/GJ, [20].

En [20] se afirma que estos costos son de 2 a 4 veces los costos de producción de la gasolina, pero se debe tener en cuenta que las CdeC tienen un rendimiento mayor a los motores de combustión interna¹, además se debe considerar de los costos ambientales asociados a estos últimos.

8.4. Costos de la generación de energía con Hidrógeno usando una CdeC

Se sabe que el hidrógeno tiene una densidad energética

$$d_e = 33,3kWh/kg [20]$$

Esto equivale a:

$$d_e = 0,12GJ/kg$$

Dado d_e y con los datos de la tabla 8.1 se puede calcular los costos mínimo y máximo en U\$\$/kg del hidrógeno incluyendo el costo de transporte y almacenamiento, estos son 1.56 y 3.72 U\$\$/kg respectivamente.

Con estos datos se estimará el costo de producir energía en U\$\$/kWh con celdas de combustible en base a hidrógeno. Se supone que se cuente con un stack de 4.2 kW del tipo S-Series, como el de la fig. 8.6.

¹El rendimiento de los motores de combustión es en general 30 %



Figura 8.6: Stack tipo S-Series, [22].

Entonces según los datos del fabricante:

- Flujo en Litros/min 36
- Presión, 10 psi

Luego usando la ecuación general de los gases se obtiene que el flujo en kg/h es:

$$Q = 7,16kg/h$$

En el caso de un escenario favorable, siendo este 1.56 U\$\$/kg se tiene que el costo de generar energía en U\$\$/kW es:

$$Cost_{fav} = 2,7U\$/kWh$$

En el caso de un escenario desfavorable, siendo este 2.8U\$\$/kg se tiene que el costo de generar energía en U\$\$/kW es:

$$Cost_{fav} = 6,4U\$/kWh$$

Este breve análisis no incluye los costos de operación y mantenimiento, el costo de inversión inicial ni otros costos asociados. En el mismo simplemente se supone que es posible acceder al hidrógeno a su costo de producción y que se utiliza el stack de la fig 8.6 funcionando a condiciones nominales para obtener energía. Se observa que el costo de esta energía es más elevado que las tarifas públicas.

Se desprende entonces que el costo de generar energía por medio de CdeC están por encima de los medio convencionales en la actualidad. Incluyendo los demás costos asociados, las metas proyectadas para generación de energía estacionaria es 1000

U\$\$/kW con una vida útil de 40000 horas, y en el caso vehicular es 50 a 100 U\$\$/kW² con una vida útil de 5000 horas, [9].

8.5. Conclusiones

- Se muestran implementaciones de sistemas que aprovechan eficientemente las capacidades de los stack por medio de co generación de calor y potencia eléctrica. Estos diseños muestran que el calor generado por las celdas de potencia estacionaria debe ser siempre aprovechado.
- Es fundamental para lograr la transición a la economía del hidrógeno la sustentabilidad de la energías naturales (eólica, solar, biomasa, entre otras) las cuales son la base del ciclo del hidrógeno.
- En la actualidad generar energía eléctrica en base a hidrógeno usando CdeC no es rentable, las ventajas del hidrógeno hoy son ecológicas y no económicas.

²Los costos de los motores de combustión son menores a 50 U\$\$/kW.

CAPÍTULO 9

Conclusiones

Se presentó un modelo eléctrico para las celdas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEMFC), previamente validado para una celda de 500W, y se aplicó con éxito a una celda experimental de 0.5W. Por lo que se concluye que el mismo es válido para caracterizar el comportamiento eléctrico de una PEMFC y es aplicable para el diseño de controladores para esta tecnología.

Luego se presentó una topología de enlace de celdas de combustible con la red eléctrica, diseñada para maximizar la potencia extraída a la celda. Las simulaciones realizadas a la misma muestran que cumple con el objetivo mencionado, además de ser robusta frente fallas tanto en la celda como en la red pública.

Por último se presenta un estudio sobre los costos de generación de energía utilizando celdas de combustible. Del mismo se deduce que en la **actualidad** no es rentable el uso de las mismas. De todas maneras, las celdas de combustible presentan un panorama muy prometedor, ya que las mismas son una forma eficiente y ecológica de producción de energía. Además las celdas de combustible abren el camino al aprovechamiento de fuentes de energía limpias y renovables como lo son la energía solar y eólica, entre otras.

Bibliografía

- [1] A. S. Sedra, K.C. Smith, "*Circuitos Microelectrónicos (4ta edición)*," Oxford University Press, México, 1999.
- [2] C. Wang, M.H. Nehrir, S.R. Shaw, "*Promising Devices for Distributed Generation*," IEEE Power and Energy Magazine, Enero-Febrero 2006, volumen 4, p47-53.
- [3] C. Wang, M.H. Nehrir, S.R. Shaw, "*Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cell Using Electrical Circuits*," IEEE Power and Energy Magazine, Junio 2006, volumen 20, p442-451.
- [4] "*Calidad del Servicio de Distribución de Energía Eléctrica*," URSEA, 2003.
- [5] G. Wang, P. Pant, H. Mohammad, P. Famouri, O. Demirci and R. Buffenbarger, "*High Efficiency Low Cost Inverter System for Fuel Cell Application*," 2003 Fuel Cell Seminar, Florida 2003, p16-20.
- [6] G. Kortum, "*Treatise on Electrochemistry (2nd Edition)*," New York:Elsevier, 1965.
- [7] G. Hoogers, "*Fuel Cell Technology Handbook*," CRC Press, New York 2003.
- [8] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, "*Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, I. Mechanistic model development*," Journal of the Electrochemical Society, 1995, vol. 142, no1, pp. 1-8.
- [9] J. C. Bolcich, "*Economía del Hidrógeno*," Asociación Argentina del Hidrógeno, ANCEF, 2005.
- [10] J. Lee, J. Jo, S. Choi, S. Han, "*A 10kW SOFC-Low Voltage Battery Hybrid. Power Processing Unit for Residential Use*," 2003 Fuel Cell Seminar, Florida 2003, p33-40.
- [11] J. Rifkin, "*La Economía del Hidrógeno*," Editorial Paidós, Barcelona 2002.

- [12] J. Sheng, J. Lai, “*Power Electronic Technologies for Fuel Cell Power System*,” Virginia Tech, Abril 2005.
- [13] J. Wang, F. Z. Peng, J. Anderson, A. Joseph and R. Buffenbarger, “*A New Low Cost Inverter System for 5kW Fuel Cell*,” 2003 Fuel Cell Seminar. Florida 2003, p1-7.
- [14] M. H. Todorovic, L. Palma, W. Choi, C. Dowling, D. Humphrey, D. Tarbell, P. Enjeti, J. Howze, “*Development of a Low Cost Fuel Cell Inverter System with DSP Control for Residential Use*,” 2003 Fuel Cell Seminar, Florida 2003, p27-32.
- [15] M. G. Simoes, F. A. Farret, “*Design and Analysis with Induction Generators*,” CRC Press, Florida 2004.
- [16] N. Amadeo, G. Baronetti, M. Chocrón, B. Irigoyen, M. Laborde, S. Larrondo, F. Mariño, R. Tejada, B. Schonbrod, V. Mas, P. Giunta, A. Romero, A. Vidal, “*Producción de Hidrógeno*” Presentación, Universidad de Buenos Aires, Mendoza, Abril de 2006.
- [17] N. Mohan, T. M. Underland, W. P. Robbins, “*Power Electronics. Converters, Applications, and Design (2nd Edition)*,” Wiley, 1995.
- [18] “*Norma EN 61000-3-2*,” (CEI, IEC 1000-3-2) Armónicos en la red de alimentación de corriente alterna.
- [19] R. Wurster, “*Overview of Existing Experience in Hydrogen and Fuel Cell in Germany and Europe*,” Recherches et perspectives industrielles sur la pile à combustible et l’hydrogène, Paris, Diciembre 2001.
- [20] W. E. Traica, “*Hidrógeno Almacenador y Transportador de Energía*,” INIFTA, Universidad Nacional de La Plata.
- [21] Colaboradores de Wikipedia. “*Economía del hidrógeno*,” Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007 [fecha de consulta: 2 de agosto del 2007]. Disponible en <http://www.wikipedia.org>.
- [22] “*Fuel Cell Store.com*,” [fecha de consulta: 2 de agosto del 2007]. Disponible en <http://www.fuelcellstore.com>.
- [23] A. Merello, F. Zinola, “*Construcción de Anodos Estables para PEMFC, Regulación y Optimización de la potencia entregada*,” Udelar, Montevideo, Diciembre 2006.
- [24] G. Rivoir, D. Giacosa, R. Biardo, “*Generación Distribuida-Conexión a la Red de Celdas de Combustible*,” Udelar, 2007.
- [25] V. Echinope, A. Salvia, A. Prieto, G. Casaravilla, “*Primer informe: Proyecto de Reglamento de la Calidad del Servicio Eléctrico*,” Julio 2003.

APÉNDICE A

Esquemáticos de Simulink

A.1. Esquemáticos de la celda

A.1.1. Stack modelo completo

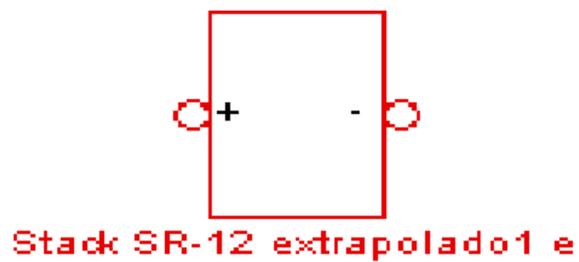


Figura A.1: Modelo externo, stack con celdas con dinámica térmica.

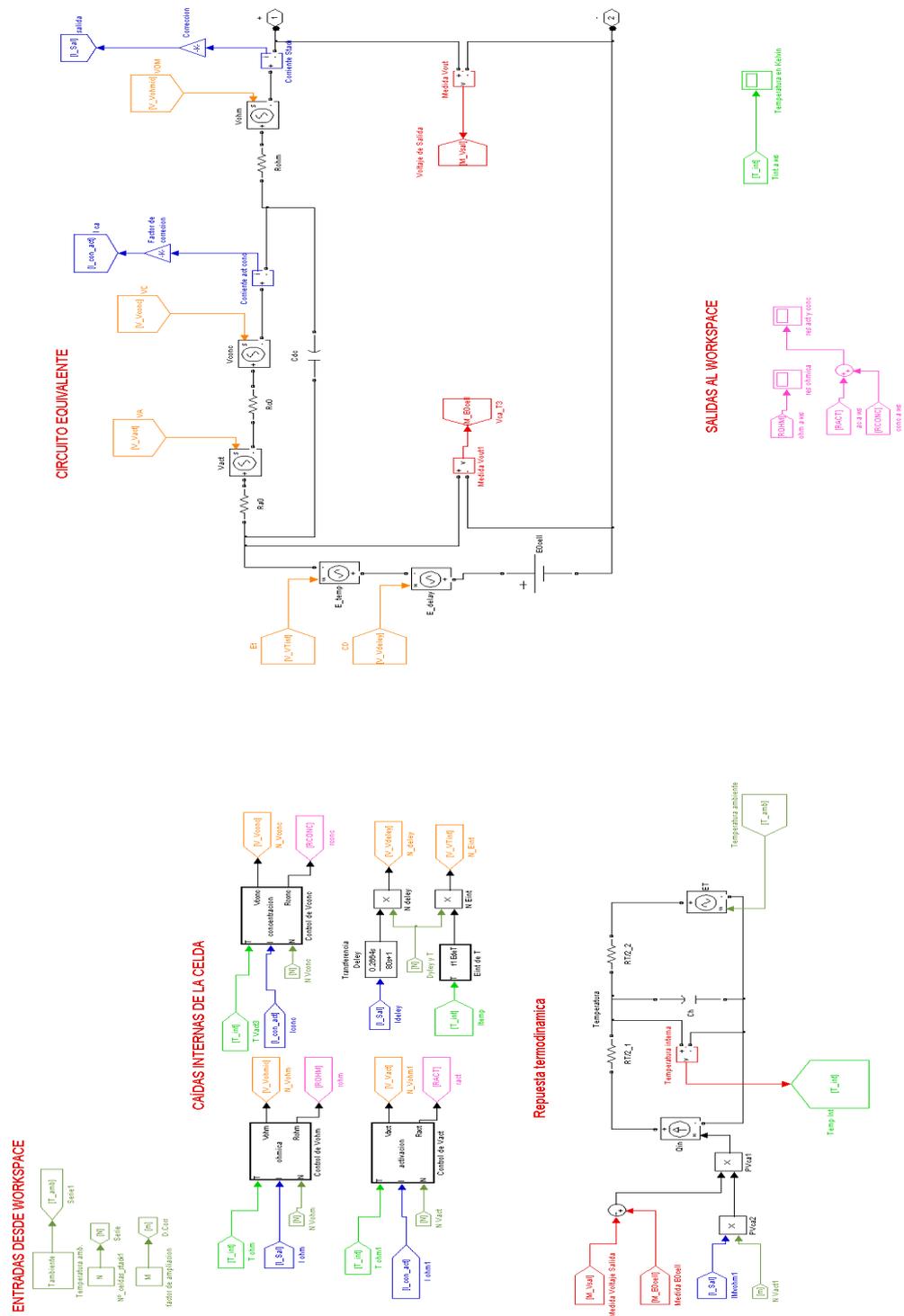


Figura A.2: Modelo completo del stack. En las figs. A.3, A.4, A.5 y A.6 se detallan cada una de sus partes.

ENTRADAS DESDE WORKSPACE

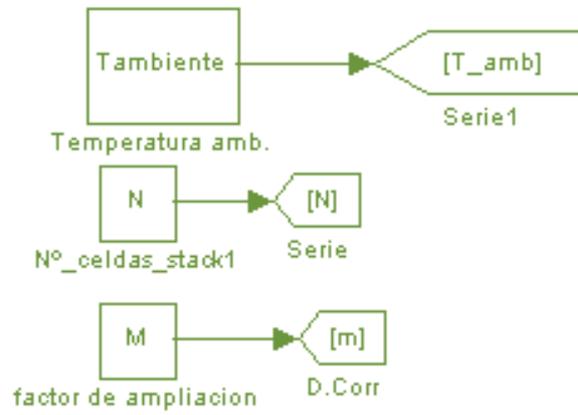


Figura A.3: Entradas desde el WorkSpace, N y M son los parámetros de extrapolación del stack.

CAÍDAS INTERNAS DE LA CELDA

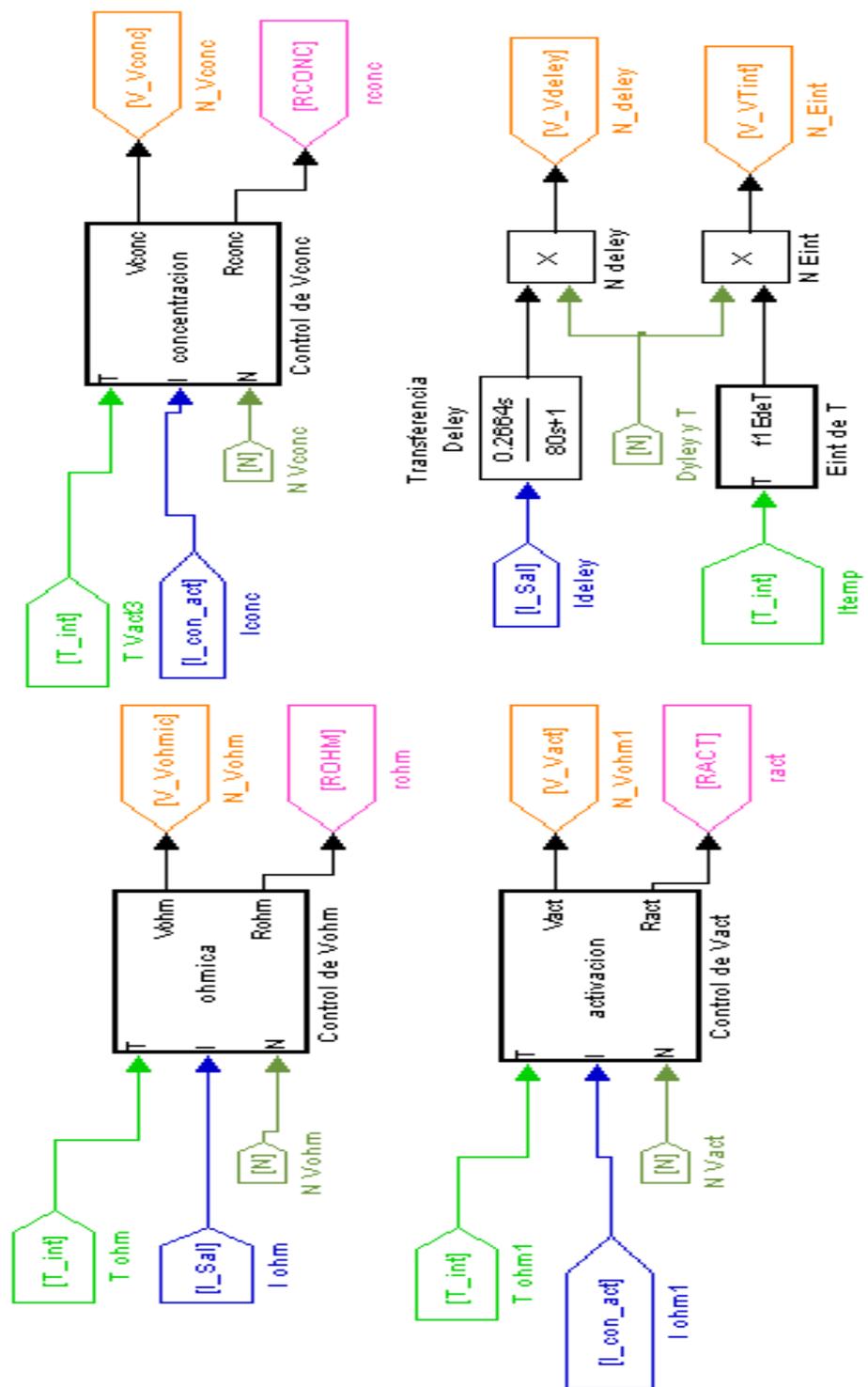


Figura A.4: Caídas de voltaje internas.

Repuesta termodinámica

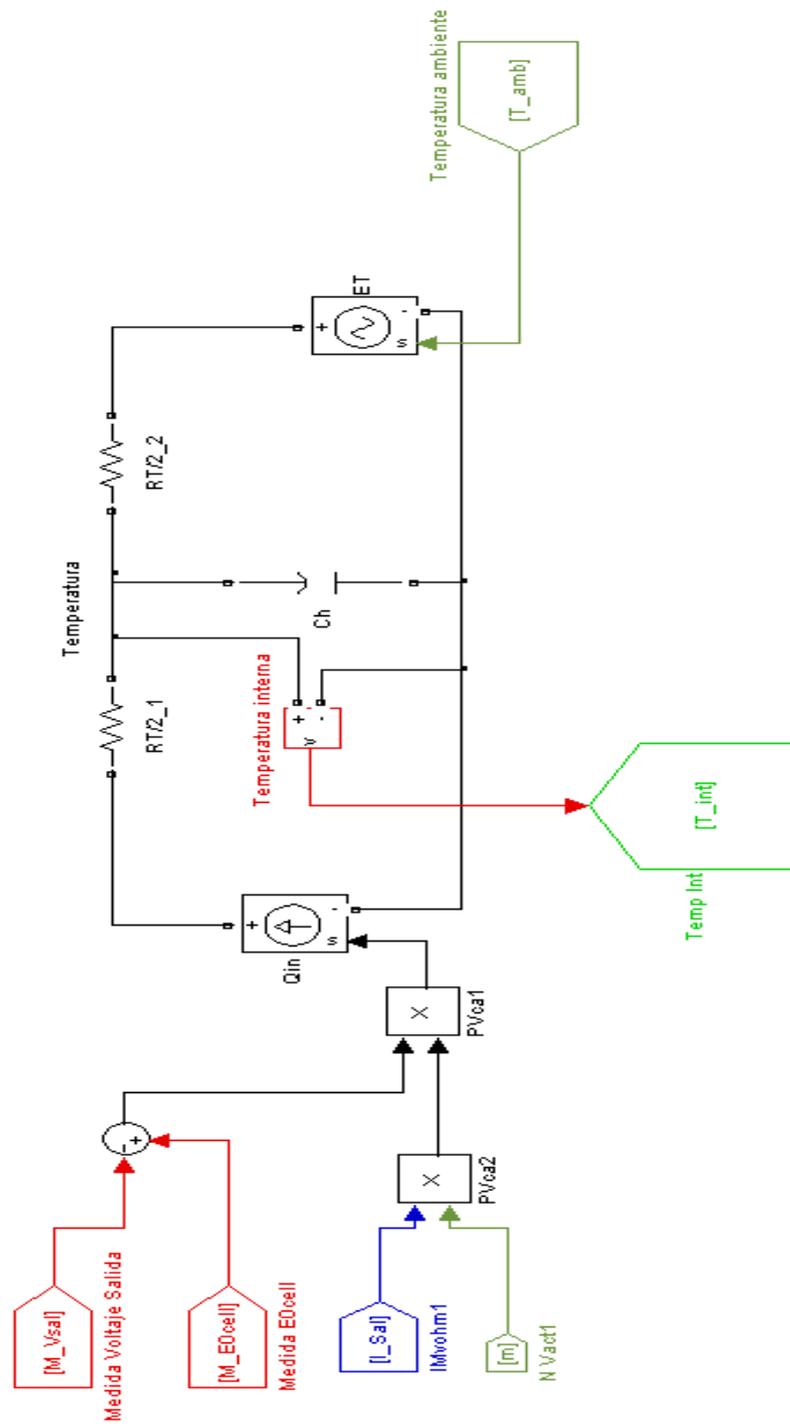


Figura A.5: Circuito termodinámico.

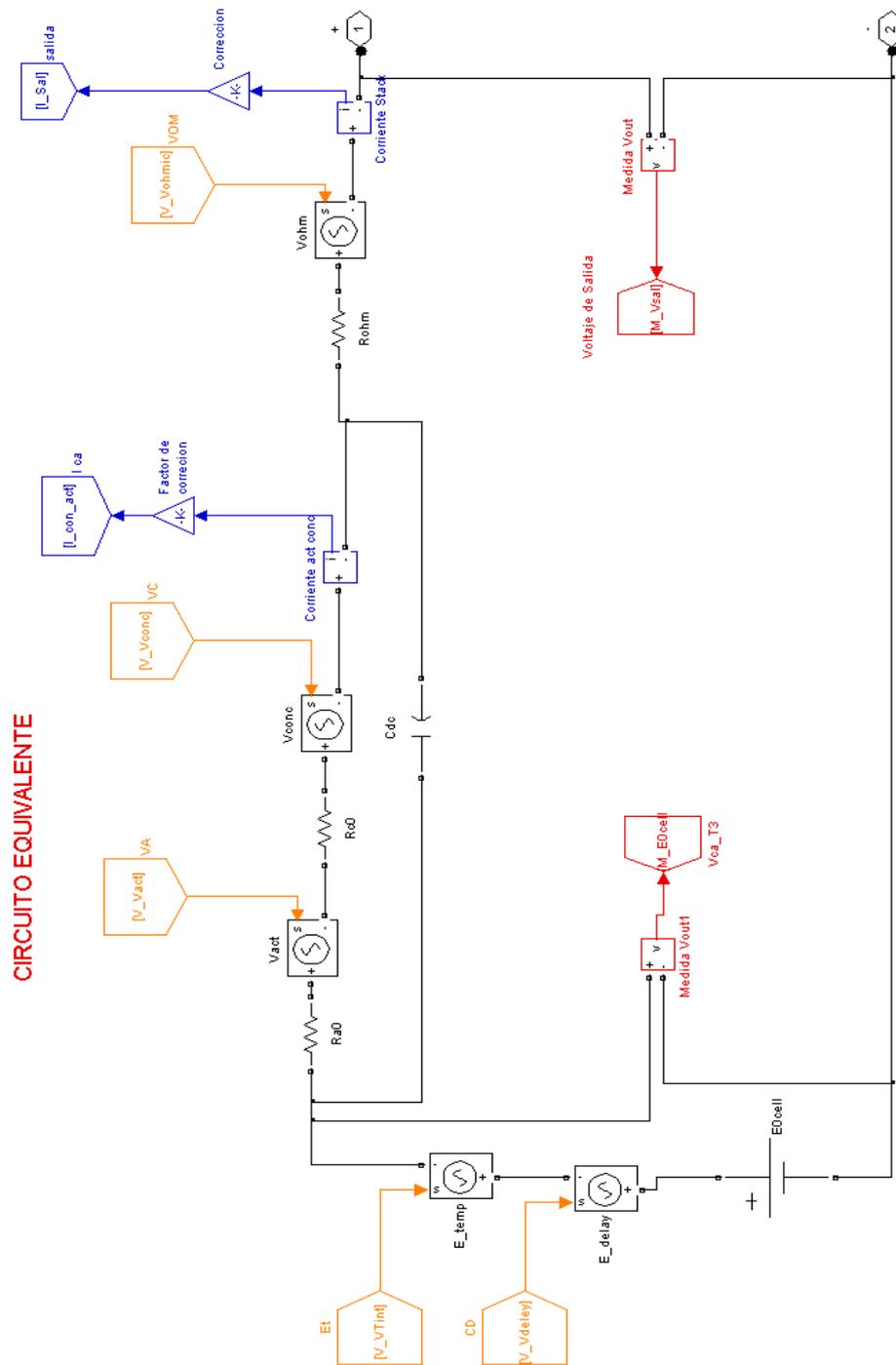


Figura A.6: Circuito equivalente.

A.1.2. Stack parámetros constantes

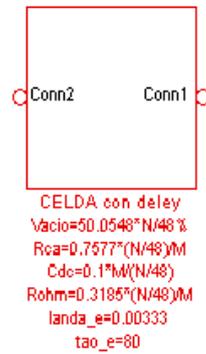


Figura A.7: Modelo externo, stack parámetros constantes.

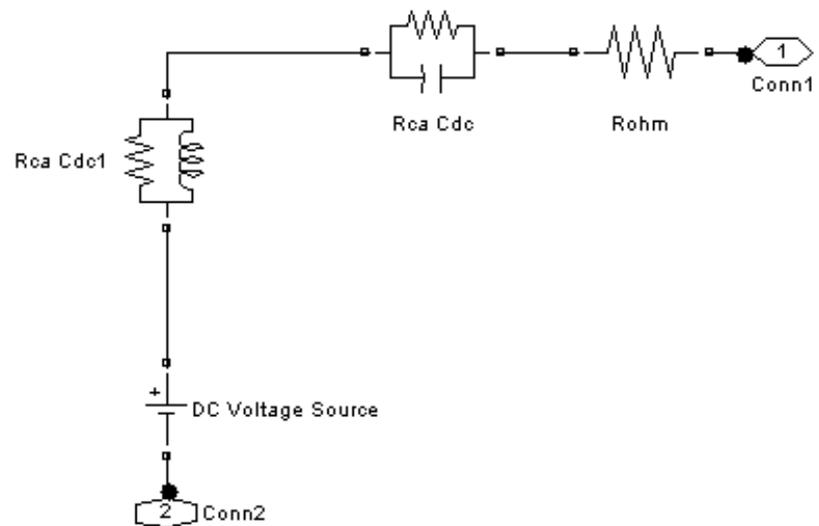


Figura A.8: Modelo interno, stack parámetros constantes T=318K.

A.2. Esquemáticos del convertor DC-DC y lazo de control con función de tracking

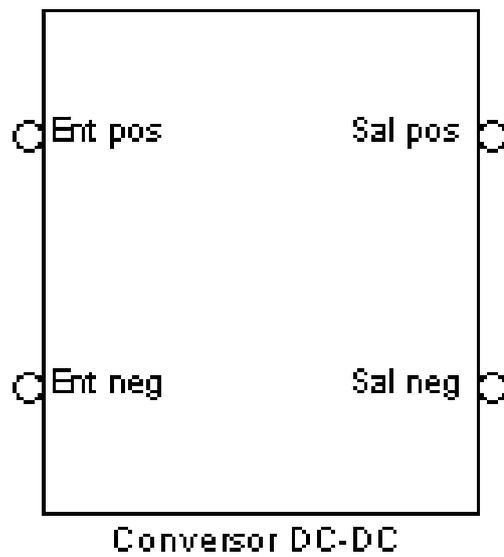


Figura A.9: Modelo externo, convertor DC-DC tracking PWM.

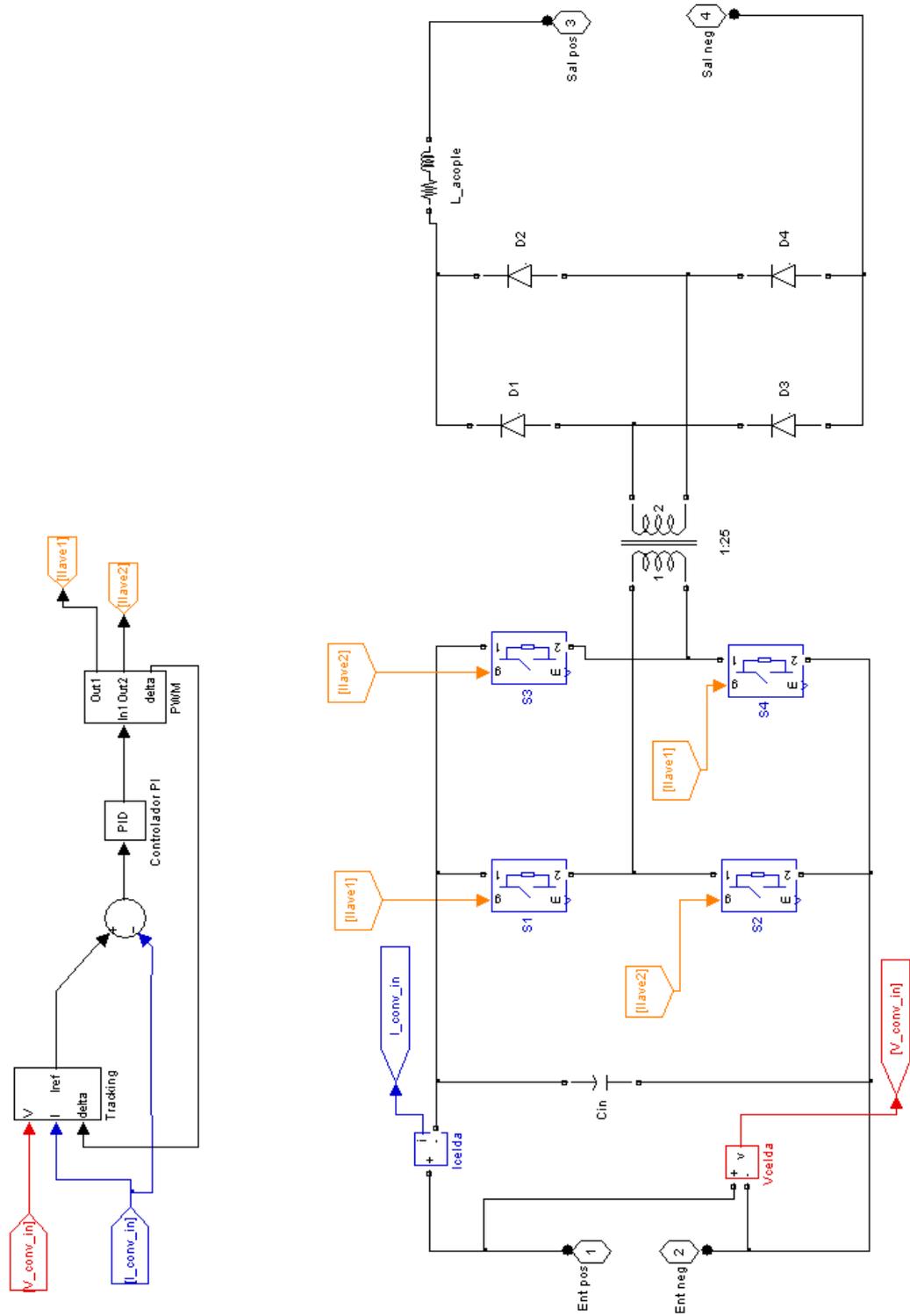


Figura A.10: Modelo interno, conversor DC-DC tracking PWM.

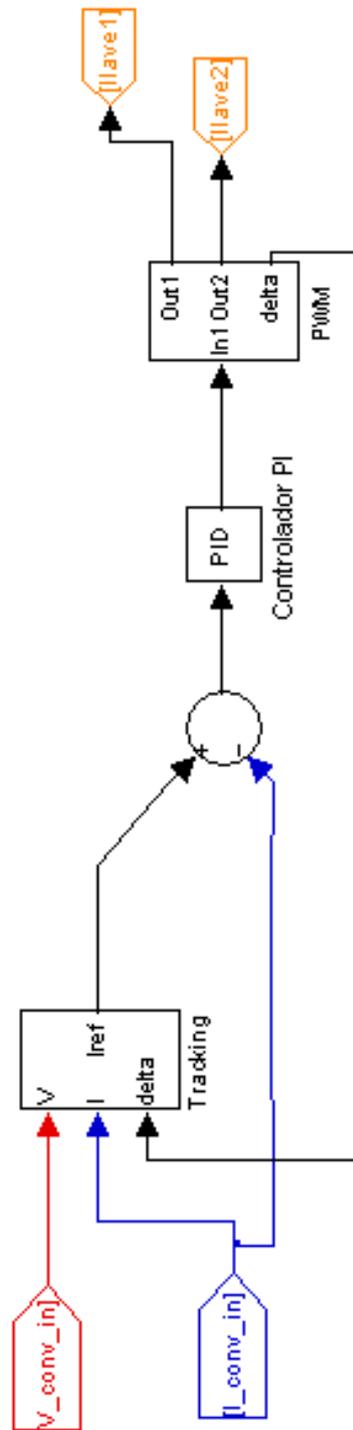


Figura A.11: Lazo de control de corriente del convertor DC-DC. El tracking se detalla en la fig. A.12.


```

function [h,inc,nuevo_paso]=control(C,anterior,anterior_menos,paso_entra,paso_min,lref,l,delta)
h=1;
inc=1;
nuevo_paso=paso_entra;

%LOGICA BASICA
if C==1 & anterior==1
    h=0;
    inc=1;
end
if C==0 & anterior==1
    h=0;
    inc=0;
end
if C==0 & anterior==0
    h=0;
    inc=1;
end
if C==1 & anterior==0
    h=0;
    inc=0;
end

%Paso adaptativo

%En este caso se reduce el paso.
if (anterior_menos~=anterior) & delta < 1
    nuevo_paso = nuevo_paso / 2;
    if nuevo_paso < paso_min
        nuevo_paso = paso_min;
    end
end

%Para evitar saturacion del PWM
if delta >= 1
    if lref > l
        h=0;
        inc=0;
    else
        h=1;
    end
end

%Para asegurar que el sistema arranque
if lref <= 0
    h=0;
    inc=1;
end

```

Figura A.13: Código del control de tracking.

A.3. Esquemáticos del VSI y su control

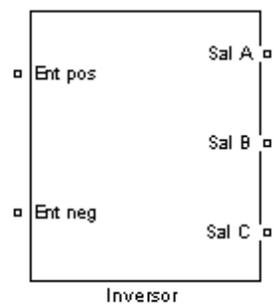


Figura A.14: Modelo externo, VSI.

A.4. Modelo del sistema completo

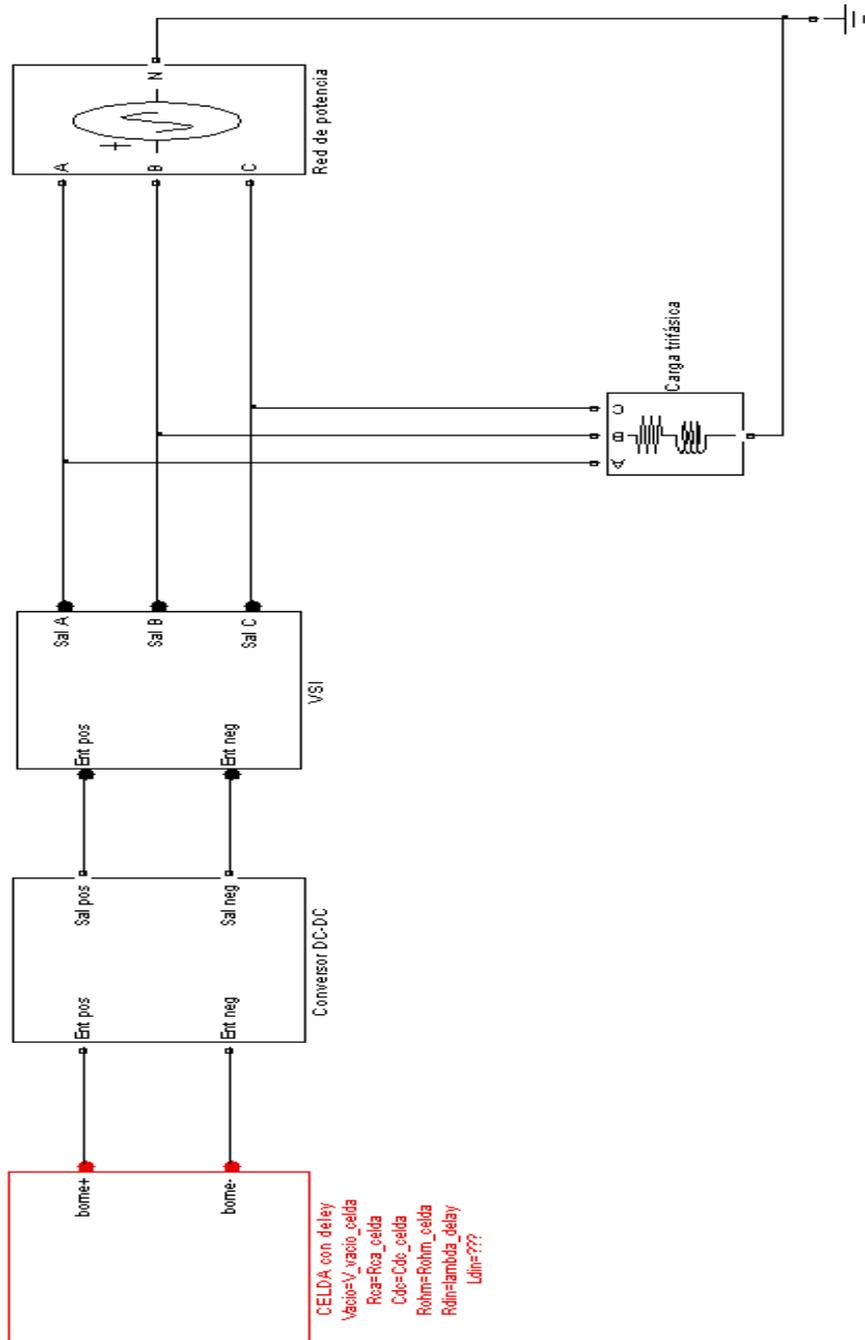


Figura A.17: Sistema completo.

APÉNDICE B

Abreviaturas

CdeC	Celda de combustible.
EPSS	Entrada en paralelo, salida en serie.
EPSP	Entrada en paralelo, salida en serie.
F.C.C	Fuente controlada de corriente.
fig.,figs.	figura, figuras.
GCCP	Generación combinada de calor y potencia.
GD	Generación distribuida.
MPC	Modelo de parámetros constantes.
PEM	Membrana de intercambio de protones.
PEMFC	Celda de combustible de membrana de intercambio de protones.
PMP	Punto de máxima potencia.
VSI	Inversor DC/AC.

Tracking de Potencia utilizando Celdas de Combustible.

Leonardo Martínez, Daniel Montaldo, Francisco Souza.

Abstract— Este artículo describe la implementación en software del control de Tracking de Potencia aplicado a celdas de combustible para maximizar la potencia extraída de este tipo de generador de energía eléctrica. El control de Tracking de Potencia comanda las llaves de un convertor full-bridge de forma que la celda de combustible se comporte como una fuente de corriente continua operando en el punto de máxima potencia de la celda de combustible (CdeC) y entregando energía a una carga eléctrica.

Keywords— Tracking de Potencia, celda de combustible, fuente de corriente, punto de máxima potencia.

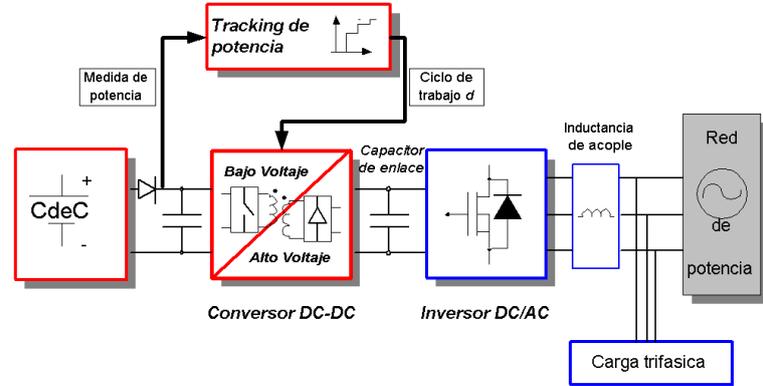


Fig. 1. Esquema del sistema completo.

I. INTRODUCCIÓN

UNA celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma energía química en energía eléctrica. Esta energía se puede aprovechar en actividades como transporte, aplicaciones portátiles y energía estacionaria. La generación distribuida (GD) es un ejemplo de generación de energía estacionaria. En este artículo se estudia el control de Tracking de Potencia aplicado a celdas de combustible utilizadas en GD. La propuesta de GD en la cual se basa el presente artículo, presentada en [1], se muestra en la figura 1.

En el sistema propuesto se identifican 3 etapas. Una primera etapa de optimización de la energía extraída de la CdeC, basada en el algoritmo de Tracking de Potencia. El algoritmo de Tracking tiene como entradas el valor de corriente y tensión instantáneas a la salida de la CdeC. Con estos valores calcula la potencia que entrega la fuente y decide según la variación de esta última, si aumenta o disminuye la corriente solicitada a la celda, con objetivo de maximizar la potencia.

Una segunda etapa es el control de la corriente suministrada por la CdeC, para que funcione entregando la máxima potencia. El mismo es en lazo cerrado y se diseña para que el sistema CdeC y convertor DC-DC siga a la corriente solicitada por el tracking.

La última etapa la constituye el inversor DC/AC de tensión (VSI). El enlace entre la etapa de continua y la etapa inversora se realiza a través de un capacitor de enlace diseñado por [2] para mantener la tensión del bus de continua fija en 415V. La etapa inversora DC/AC desarrollada por [2] se acopla a la red de potencia y alimentan en conjunto una carga trifásica.

De esta propuesta se toma la etapa de continua para analizar en detalle el algoritmo de Tracking de Potencia. Se explica el funcionamiento del algoritmo para maximizar potencia. Se presenta el diagrama de control de corriente de la celda de combustible funcionando con Tracking, y se analiza la estabilidad del mismo. Finalmente se presentan los resultados de las simulaciones.

II. ALGORITMO DE TRACKING

El tracking de potencia es un algoritmo de posicionamiento en torno al punto máximo de una curva característica potencia vs corriente de una fuente de energía, ya sea un generador eólico, un generador convencional o una fuente de continua como en el caso de una CdeC. Este algoritmo consiste en incrementar de a pasos (en un principio fijos, pero luego pueden ser variables) la corriente exigida a la fuente, a este valor de paso se le denominará (ΔI_k). Después de aumentar un paso la corriente se debe esperar un tiempo determinado, t_{paso} , a que evolucione la potencia alcanzada por la fuente. Al cabo de este tiempo se mide la potencia y de acuerdo al valor medido, ya sea mayor o menor al valor de potencia del paso anterior, se decide incrementar o decrementar respectivamente la corriente en un valor (ΔI_k). Este procedimiento continúa repitiéndose hasta que el algoritmo alcanza el punto de máxima potencia¹ (*PMP*) de la curva, momento a partir del cual, la corriente permanece oscilando en torno a este punto, [3].

¹El algoritmo asume que existe un único máximo en la curva de potencia.

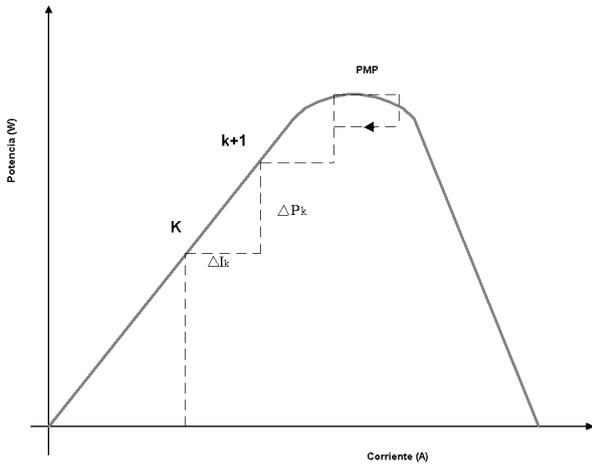


Fig. 2. Posicionamiento del tracking en la curva de potencia

La fig. 2 ilustra esta situación. En esta imagen se ve como el algoritmo escala hasta el PMP y luego que lo alcanza se observan las oscilaciones entorno a este punto. Finalmente en la fig. 3 se aprecia el diagrama de flujo del algoritmo de tracking.

A. Tracking con paso adaptativo

El tracking implementado presenta la característica de ser de paso adaptativo. El paso adaptativo permite reducir el paso de corriente ΔI_k una vez que la búsqueda del PMP llega a régimen y la corriente que impone el algoritmo se encuentra oscilando entorno a ese punto. Esta reducción progresiva del paso de corriente se realiza hasta un valor límite $\Delta I_{klimit} > 0$, que se calcula como porcentaje del valor inicial del paso de corriente.

III. CONTROL DE CORRIENTE DE UNA CDEC

La etapa de continua de la propuesta de GD[1], se comanda mediante control de corriente suministrada por la CdeC. La fig. ?? muestra el diagrama de bloques Simulink implementado para el funcionamiento del control. Para calcular la corriente que debe suministrar la CdeC, el tracking utiliza como entradas la tensión en bornes de celda y la corriente que entrega la misma. Este valor de corriente (I_{ref}) debe ser seguido por el control de corriente. El mismo es en lazo cerrado y se diseña para que el sistema CdeC y convertor DC-DC siga a la corriente solicitada por el tracking. Está implementado por medio de un controlador PI en serie con el control PWM de frecuencia portadora de 10kHz. El controlador PI tiene como entrada la diferencia entre la salida del tracking y la corriente de la CdeC, y pone en la salida la modulante que usa el PWM para generar el comando de las llaves del convertor DC-DC (full-bridge). El diseño del convertor full-bridge posibilita que la corriente entregada a la etapa inversora sea cuasi constante, de esta forma el conjunto CdeC-convertor DC-DC implementa una fuente de corriente que optimiza la potencia extraída a la CdeC.

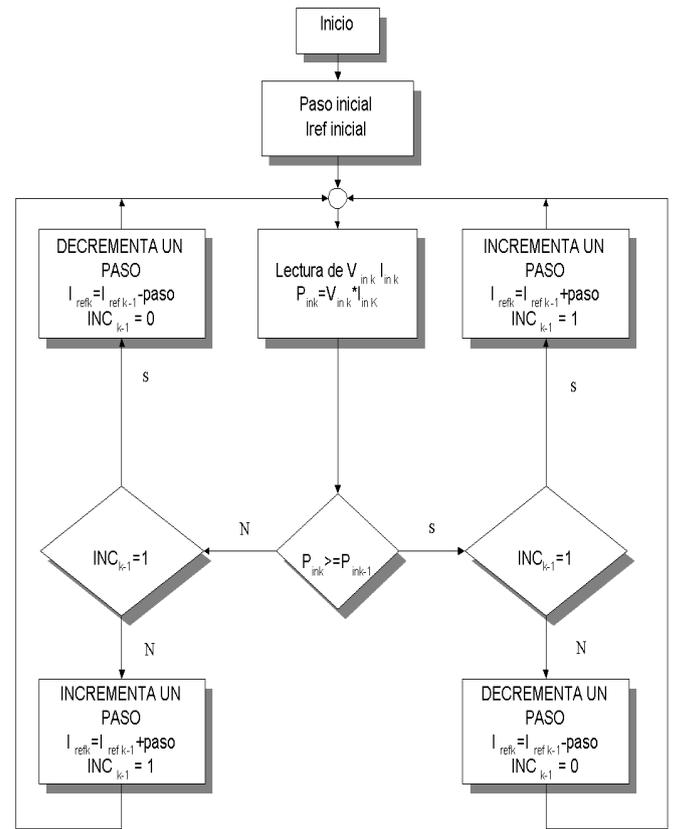


Fig. 3. Diagrama de flujo del algoritmo de tracking

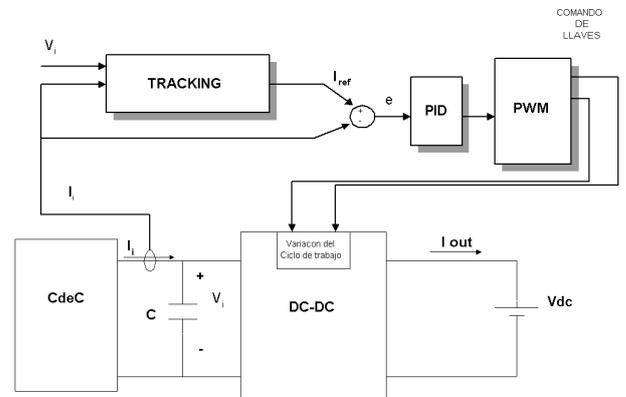


Fig. 4. Diagrama de bloques Simulink del control de corriente.

A. Estabilidad del sistema de control

A los efectos de modelar el sistema de control se linealiza el circuito conformado por la CdeC, el convertor y la carga (modelada en la fig. ?? como una fuente de tensión constante V_{dc}) en torno al punto de funcionamiento de máxima potencia [1], obteniéndose así los circuitos equivalentes de las fig. 5 y 6. Estos modelan la celda y el Full-Bridge visto desde el primario cuando las llaves están cerradas y abiertas respectivamente.

A continuación se desarrollan las ecuaciones del sistema: Llaves en ON:

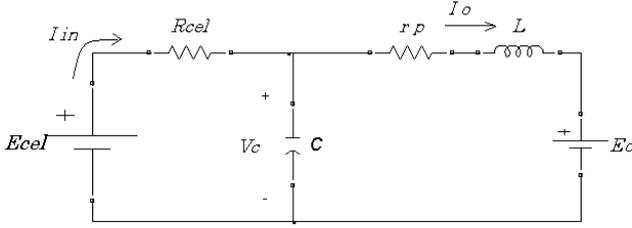


Fig. 5. Circuito equivalente con las llaves cerradas.

Ecuaciones del sistema:

$$v_c - r_p \cdot i_o - L \cdot \frac{\partial i_o}{\partial t} = E_o \Rightarrow \frac{\partial i_o}{\partial t} = \frac{v_c - r_p \cdot i_o - E_o}{L}$$

$$i_{in} - i_o = C \cdot \frac{\partial v_c}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial v_c}{\partial t} = \frac{i_{in} - i_o}{C}$$

$$i_{in} = \frac{E_{cel} - v_c}{R_{cel}}$$

i_{in} , es la corriente entregada por el stack.

i_o , es la corriente entregada al VSI.

v_c , tensión en bornes del capacitor.

E_o , carga eléctrica, representada en la fig. ?? por V_{dc} .

Llaves en OFF:

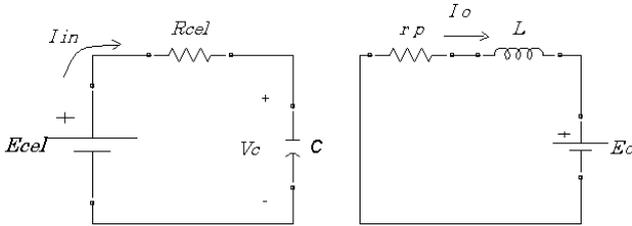


Fig. 6. Circuito equivalente cuando las llaves están abiertas.

Ecuaciones del sistema:

$$\frac{\partial i_o}{\partial t} = \frac{v_c - r_p \cdot i_o - E_o}{L}$$

$$i_{in} = \frac{E_{cel} - v_c}{R_{cel}}$$

Promediando la descripción en variables de estado usando el ciclo de trabajo de las llaves (d) [4], se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_o \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L} & \frac{d}{L} \\ \frac{-1}{C} & \frac{-1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{cel}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_o \\ E_{cel} \end{bmatrix}$$

Introduciendo pequeñas perturbaciones y separando en componentes de continua y de señal resulta:

$$d = D + \tilde{d}$$

$$i_o = I_o + \tilde{i}_o$$

$$v_c = V_c + \tilde{v}_c$$

Se considera que las entradas E_{cel} y E_o se mantienen constantes. En régimen los valores de las tensiones y corrientes quedan determinados por:

$$I_o = \frac{V_c \cdot D - E_o}{r_p}$$

$$V_c = E_{cel} - I_o \cdot R_{cel} \Rightarrow V_c = (E_{cel} + E_o \cdot \frac{R_{cel}}{r_p}) \cdot \frac{1}{1 + D \frac{R_{cel}}{r_p}}$$

$$I_{in} = \frac{E_{cel} - V_c}{R_{cel}}$$

En señal los valores correspondientes quedan determinados por:

$$\dot{\tilde{i}}_o = -i_o \cdot \frac{r_p}{L} + \tilde{v}_c \cdot \frac{D}{L} + \tilde{d} \cdot \frac{V_c}{L}$$

$$\dot{\tilde{v}}_c = -i_o \cdot \frac{1}{C} - \tilde{v}_c \cdot \frac{1}{R_{cel}C}$$

$$\tilde{i}_{in} = -\frac{1}{R_{cel}} \cdot \tilde{v}_c$$

No se toman en cuenta los términos de segundo orden. Pasando al dominio en Laplace y despejando se obtiene la transferencia:

$$\frac{\tilde{i}_{in}}{\tilde{d}} = \frac{V_c}{R_{cel}LC} \cdot \frac{1}{s^2 + (\alpha + \frac{r_p}{L})s + \frac{D}{LC} + (\alpha \frac{r_p}{L})} \quad (1)$$

$$\text{donde } \alpha = \frac{1}{R_{cel}C}$$

El diagrama de bloques del sistema de control se presenta en la fig. 7. La transferencia del circuito CdeC, convertidor y carga resulta:

$$P(s) = \frac{\tilde{i}_{in}}{\tilde{d}} = \frac{20,4 \times 10^6}{s^2 + 252s + 27 \times 10^3}$$

El controlador:

$$PI = 0,02(1 + \frac{0,422}{0,02} \cdot \frac{1}{s})$$

El bloque PWM:

$$\frac{\tilde{d}}{\tilde{i}_{in}} = 1$$

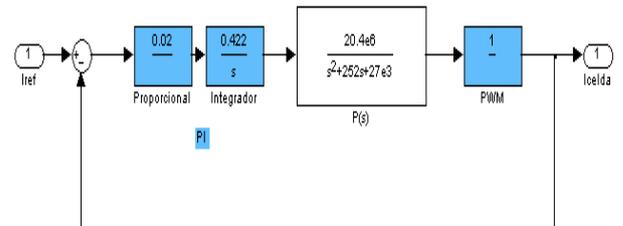


Fig. 7. Diagrama de bloques del sistema de control.

El lugar de los polos del sistema en lazo cerrado se muestra en la fig. 8

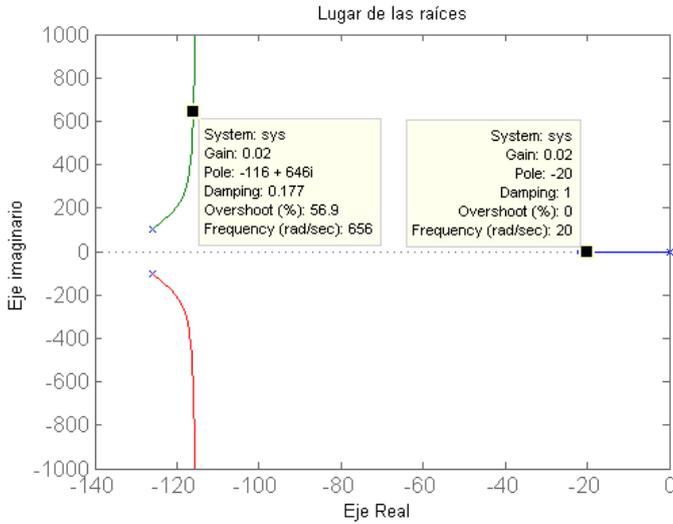


Fig. 8. Ubicación de los polos del sistema controlado.

El sistema presenta un margen de fase de 32° , un sobretiro de 50% y un tiempo de asentamiento de $t_s = 0,05\text{seg}$. Este tiempo es menor que el tiempo de respuesta del tracking, $0,15\text{seg}$. Este último se establece empíricamente relevando las características óptimas de funcionamiento del tracking. El sobretiro se puede mejorar tomando tiempos de asentamiento superiores.

IV. SIMULACIONES

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones del sistema de la fig. ?? utilizando la CdeC SR_H ². La carga eléctrica se modela mediante una fuente de tensión constante de 415V, emulando el voltaje de entrada a una posterior etapa inversora. Al condensador de entrada al puente denominado C en la fig. ??, se le impone una condición inicial de voltaje igual a la tensión de vacío de la CdeC, 45V, con el fin de evitar transitorios causados por el flujo de energía entre el condensador y la CdeC.

En la fig. 9 se muestra la corriente de salida de la CdeC junto con la corriente I_{ref} , calculada por el control de Tracking. El lazo de control obliga a la corriente de la CdeC a seguir a la corriente I_{ref} . En régimen el error tiende a cero (señal e de la fig. ??). Se puede ver como el paso de corriente se reduce una vez alcanzado el PMP poco antes de 1.2 segundos de simulación.

² SR_H : stack de celdas de 4.2 kW modelado a partir de extrapolar el stack Avista Lab SR-12 de 500W[5][1].

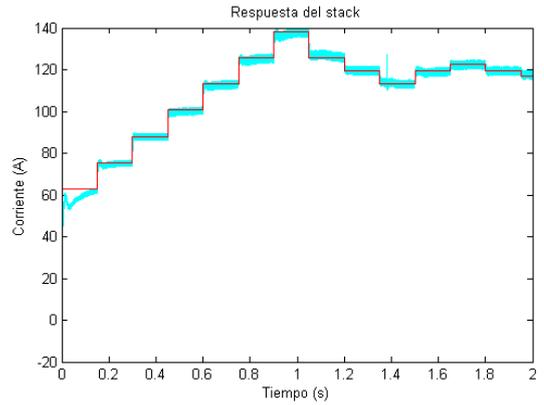


Fig. 9. Corriente de la CdeC junto con la I_{ref} del Tracking

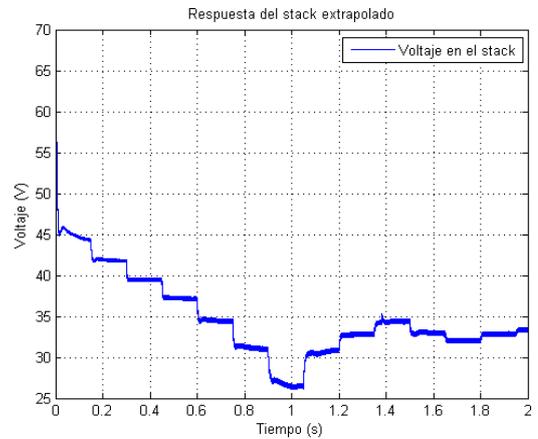


Fig. 10. Voltaje de salida de la CdeC.

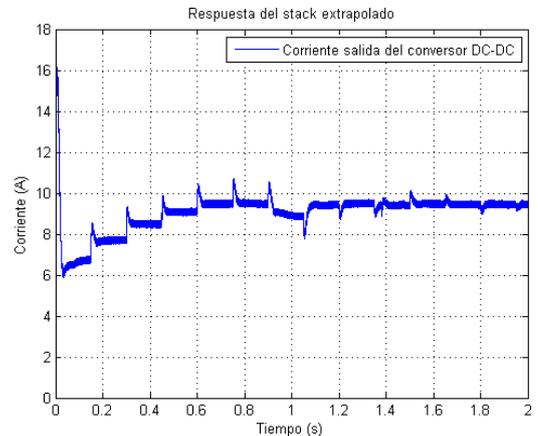


Fig. 11. Corriente de salida del convertor DC-DC.

En la fig. 10 se muestra la gráfica del voltaje de salida de la CdeC, se aprecia la respuesta dinámica a los escalones de corrientes impuestos por el Tracking.

En la fig. 11 se muestra la corriente de salida del convertor DC-DC en donde se aprecia en cada escalón el sobretiro ya referido.

En la fig. 12 se grafican las potencias instantáneas en la entrada y en la salida del conversor DC-DC. Se observa como en $t = 1\text{seg}$, tanto la corriente de salida como la potencia entregada, tienen un escalón negativo, mostrando que el tracking se pasó del punto de máxima potencia, rectificando y convergiendo en el paso siguiente.

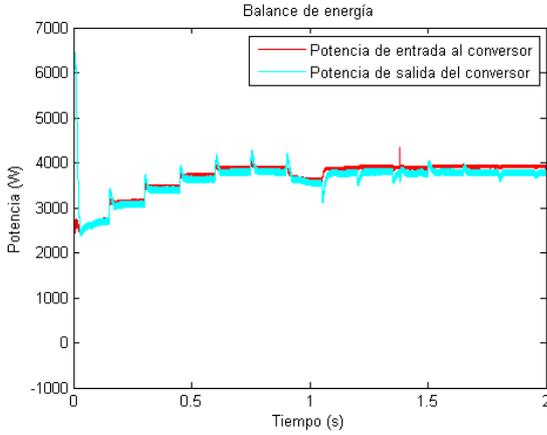


Fig. 12. Balance de potencia del sistema.

V. CONCLUSIONES

El Tracking de Potencia con paso adaptativo se presenta como una alternativa eficiente para extraer energía de una CdeC y poder enviarla a una etapa inversora que actúe como interfaz con red de distribución (GD). En tanto que el control de corriente implementado con Tracking permite mantener la corriente entregada por el conversor DC-DC en valores “seguros”, evitando sobrecorrientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dejar constancia de agradecimiento por la orientación brindada por los tutores; Ing. Gonzalo Casaravilla e Ing. Andrés Merello, que a lo largo del proyecto no dejaron de dar sugerencias, despejar dudas y motivar para que se cumplieran los objetivos.

REFERENCIAS

- [1] D. Montaldo, L. Martinez, F. Souza, *Proyecto de fin de carrera: “Entrega de Energía a la Red a partir de Celdas de Combustible”*, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Setiembre de 2007.
- [2] G. Rivoir, D. Giacosa, R. Biardo, *“Generación Distribuida-Conexión a la red de celdas de combustible,”* 2007.
- [3] M. G. Simoes, F. A. Farret, *“Design and Analysis with Induction Generators,”* CRC Press, Florida 2004.
- [4] Mohan, Underland, Robbins, *Power Electronics. Converters, Applications, and Design*, Wiley, 1995.
- [5] C. Wang, M.H. Nehrir, S.R. Shaw, *“Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cell Using Electrical Circuits,”* IEEE Power and Energy Magazine, Junio 2006, volumen 20, p442-451.

APÉNDICE

■ $I_o = \frac{V_c D - E_o}{r_p} > 0$. La tensión en el condensador de enlace vista desde el primario del circuito es $E_o = \frac{E_{out}}{n} = \frac{400}{n}$. Seleccionando un ciclo de trabajo $D = 0,5$ y considerando una tensión mínima en el stack $V_c = 35V$, la relación de

transformación queda determinada por

$$n > \frac{400}{35 \cdot 0,5} = 23. \text{ Se selecciona } n = 25.$$

■ Ripple en la corriente entregada al VSI. Se diseña el inductor del filtro para que el máximo ripple no supere los $0,1A$. Por tanto,

$$\Delta I = \frac{n \cdot V_d - V_{out}}{L} \cdot D \cdot T \leq 100mA.$$

V_d representa la tensión de salida del puente de diodos. Despejando el valor del inductor resulta:

$$L \geq D \cdot T \cdot \frac{n \cdot V_d - V_{out}}{\Delta I} = 0,5 \cdot 0,1ms \cdot \frac{(25 \cdot 35 - 400)V}{100mA} = 220mH$$

Se toma $L = 250mH$.

■ Disipación de potencia en la inductancia. Se considera que la inductancia no puede disipar mas de 1% de la potencia entregada, es decir

$$r_L \cdot I_{out}^2 = 40W \Rightarrow r_L = 0,4\Omega. \text{ La resistencia } r_p \text{ de la figura 5 se relaciona con } r_L \text{ por } r_p = \frac{r_L}{n^2}, \text{ en tanto que}$$

$$I_{out} = \frac{I_o}{n} = 10A$$

■ Dimensionamiento del capacitor:

Considerando que el stack entrega corriente I_{in} aproximadamente constante, el valor del ripple de tensión en bornes del capacitor queda determinado por $V_{c-pp} = \frac{I_{in}}{2Cf}$.

El ripple de corriente en tanto es $I_{in-pp} = \frac{I_{in}}{2RCf}$. Admitiendo una variación de $I_{in-pp} = 0,02A$ el capacitor debe tener una capacidad de $C = \frac{1}{2 \cdot 85m\Omega \cdot 10kHz \cdot 0,02} = 29,4mF$. Se elige $C = 47mF$

Con los valores calculados se obtienen los coeficientes de la ecuación (1):

$$\frac{\tilde{i}_{in}}{\tilde{d}} = \frac{20,4 \times 10^6}{s^2 + 252s + 27 \times 10^3}$$

Sistema de 2° grado con polos en $s = -126 \pm 105,5i$.

Se analizaron diversos controladores para los requisitos de error nulo y rápida respuesta escalón. Finalmente se opta por implementar un control PI para controlar la corriente que entrega la celda al variar el ciclo de trabajo.

$$PI = k_p \left(1 + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{1}{s} \right)$$

Con este controlador la expresión total en lazo cerrado es:

$$H(s) = k_p \cdot \frac{A \cdot \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{s^3 + 2\xi\omega_n s^2 + (\omega_n^2 + Ak_p)s + k_i A}$$

Siendo $A = 20,4 \times 10^6$, $2\xi\omega_n = 252$, $\omega_n^2 = 27 \times 10^3$. Reescribiendo el denominador en la forma $(s + p) \cdot (s^2 + \alpha s + \beta)$, se obtiene el siguiente sistemas de ecuaciones:

$$\begin{cases} p + \alpha = 2\xi\omega_n \\ p\alpha + \beta = \omega_n^2 + A \cdot k_p \\ p\beta = A \cdot k_i \end{cases}$$

Se toman como condiciones de diseño que el polo real sea tal que $3\tau \leq 0,15$. Esto es porque $0,15$ segundos es el tiempo de paso del tracking de potencia. De aquí resulta $p = 20$.

La otra condición de diseño es que el valor de ganancia k_p sea tal que el PWM no sature frente a un escalón de $25A$ en la corriente, dado que el primer paso de tracking es de esa amplitud. Se toma $k_p = \frac{1}{50} = 0,02$. Los restantes valores son: $\alpha = 232$ $\beta = 430,36 \times 10^6$ y $k_i = 0,422$.



Leonardo Martínez, Montevideo 1981. Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) desde el año 2000, donde cursa actualmente sus últimas materia de grado de la carrera Ingeniería Eléctrica opción electrónica. En el ámbito laboral se desempeña en temas relacionados a la distribución de energía eléctrica en la A.N.P. Entre sus intereses se encuentra la automatización y la informática industrial.



Daniel Montaldo, Montevideo 1982. Ingresó a la Facultad de Ingeniería en el año 2001. En Agosto de 2007 defendió el proyecto de fin de carrera con el cual obtuvo el título de Ingeniero Electricista opción telecomunicaciones. En el ámbito laboral se desempeña en la sección mantenimiento de la A.N.P.



Francisco Souza, Montevideo 1982. Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR desde el año 2000. Defendió el proyecto de fin de carrera en Agosto de 2007. Le restan dos exámenes para obtener el título de Ingeniero Electricista opción potencia. Actualmente está cursando la asignatura de actualización “Estabilidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia” e investigando en relación con dicha asignatura los sistemas de excitación de los principales centros de

generación de energía del país.

En el ámbito laboral se desempeña como asesor de calidad de una empresa de ingeniería eléctrica de nuestro país.