

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA



TESIS DOCTORAL

PORTADA

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE (MEAs) DURANTE DIFERENTES REGÍMENES DE OPERACIÓN Y ANTE VARIACIONES DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y PERTURBACIONES EXTERNAS, PARA PILAS DE COMBUSTIBLE DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEM) UTILIZANDO SISTEMA DAQ MULTIFUNCIÓN.



Milena Linette Zambrano Hernández

**Programa de Doctorado en Modelización y Experimentación
en Ciencia y Tecnología**

2020

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA



TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE (MEAs) DURANTE DIFERENTES REGÍMENES DE OPERACIÓN Y ANTE VARIACIONES DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y PERTURBACIONES EXTERNAS, PARA PILAS DE COMBUSTIBLE DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEM) UTILIZANDO SISTEMA DAQ MULTIFUNCIÓN.

Milena Linette Zambrano Hernández

**Programa de Doctorado en Modelización y Experimentación
en Ciencia y Tecnología**

Directores de la Tesis:

Dr. Manuel Calderón Godoy

Dr. Antonio José Calderón Godoy

Dr. Juan Félix González González

2020

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha podido llevarse a cabo gracias a la financiación recibida a través de la beca IFARHU-SENACYT dentro del programa de Excelencia Ronda 1 para estudios de doctorado, a quienes agradezco grandemente todo el apoyo recibido.

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza, la salud y lo necesario en cada momento de mi vida.

A mis directores de tesis: Dr. Antonio José Calderón Godoy, Dr. Manuel Calderón Godoy y Juan Félix González González, por darme la oportunidad de realizar esta tesis doctoral en el grupo de investigación GAIRBER y por darme la orientación necesaria para avanzar en cada etapa del proyecto.

A mis amados padres, mis hermanos y amigos, quienes estuvieron brindándome su apoyo y consejos en cada momento.

A los colaboradores, docentes e investigadores de la Universidad de Extremadura y de la Universidad Tecnológica de Panamá que de una u otra forma me dieron su apoyo durante el desarrollo de la tesis.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO	3
1.3 COMPONENTES	4
1.4 CLASIFICACIÓN DE PILAS DE COMBUSTIBLE	6
1.4.1 Pilas de combustible de intercambio protónico (PEMFC).....	7
1.4.2 Pilas de combustible alcalinas (AFC).	7
1.4.3 Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).	7
1.4.4 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC).....	7
1.4.5 Pilas de combustible de metanol directo (DMFC).....	8
1.4.6 Pilas de combustible de Óxido Sólido (SOFC).....	8
1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	8
1.6 FUNCIONAMIENTO IDEAL DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE	9
1.7 FUNCIONAMIENTO REAL DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE (CUANTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS)	9
1.7.1 Pérdidas por activación.	11
1.7.2 Pérdidas óhmicas.....	11
1.7.3 Pérdidas de Concentración (V_{con}).	12
1.8 CARACTERIZACIÓN DE PILAS DE INTERCAMBIO PROTÓNICO	13
1.8.1 Tipos de caracterización.	13
1.8.2 Técnicas de caracterización.....	14
1.8.2.1 Técnicas in situ.....	14
1.8.2.1.1 Interrupción de corriente.....	15
1.8.2.1.2 Espectroscopia de impedancia.....	16
1.8.2.1.3 Voltametría cíclica.....	17
1.8.2.2 Técnicas ex situ.	19
1.8.2.2.1. Determinación de la porosidad.....	19
1.8.2.2.2 Permeabilidad.	20
1.8.2.2.3. Capacidad de absorción de agua.	21
1.8.2.2.4. Conductividad protónica.....	21
1.8.2.2.5. Capacidad de intercambio iónico.....	23

1.9 TÉCNICAS Y DIAGNÓSTICOS DE FALLOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE DE INTERCAMBIO	
PROTÓNICO	23
1.9.1 Revisión de métodos de diagnóstico basados en modelos.....	27
1.9.2 Revisión de métodos de diagnóstico no basados en modelos.....	30
1.10 JUSTIFICACIÓN	34
1.11 OBJETIVOS	35
1.11.1 General.....	35
1.11.2 Específicos.....	35
1.12 CONTENIDO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	35
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	37
2.1 METODOLOGÍA	37
2.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN	37
2.3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN	38
2.3.1 Fuente de alimentación EP-603.....	39
2.3.2 Módulo de batería de celdas Nexa Power™.....	39
2.3.2.1 Stack de la pila de combustible NEXA.....	40
2.3.2.2 Interfaces del módulo de Pila Nexa.....	41
2.3.2.3 Sistema de alimentación eléctrica auxiliar.....	44
2.3.2.4 Sistema electrónico de control.....	44
2.3.3 Sistema de alimentación de combustible.....	45
2.3.4 Sensores.....	45
2.3.4.1 Sensores de temperatura.....	45
2.3.4.2 Sensor de corriente HTB100-TP.....	47
2.3.4.3 Sensor de presión.....	48
2.3.5 Módulos de Adquisición de Datos DAQ (Data acquisition Systems).....	49
2.3.6 Placa de aislamiento PCB.....	51
2.3.6.1 Amplificador de Aislamiento ISO 124P.....	53
2.3.6.2 Convertidor DC/DC AS-1WR2.....	54
2.3.6.3 Módulos FZ0430 divisor de tensión.....	55
2.3.6.4 Filtros capacitivos de desacoplo.....	56
2.3.6.5 Diodo rectificador 1N4005.....	56
2.3.6.6 Esquemático de conexiones de las tarjetas de aislamiento y elementos de medición. ...	57
2.4 PROGRAMAS DE MONITORIZACIÓN	59
2.4.1 Nexa OEM.....	60

2.4.2 Programa de monitorización en LabView.	61
2.4.2.1 Software desarrollado en LabView.....	61
2.5 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	64
2.5.1 Sistema heliocentris.	64
2.5.2 Sistema de adquisición de datos multicanal.	65
2.6 ENSAYOS CON EL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN MULTICANAL.....	68
2.6.1 Instalación Experimental.	68
2.6.2 Carga electrónica Serie 3260.	69
2.6.3 Características estacionarias y transitorias de Pila de Combustible PEM del CNH (Centro Nacional de Hidrógeno).	70
2.6.3.1 Operación estática.	71
2.6.3.1.1 Relación entre la corriente de carga de la pila y la temperatura de operación del stack.	71
2.6.3.1.2 Ensayos para definir la curva de polarización.	72
2.6.3.1.3 Distribución del voltaje a lo largo del stack.	72
2.6.3.2 Operación dinámica.	73
2.6.3.2.1 Respuesta transitoria bajo diferentes condiciones de carga a escala constante.	73
2.6.3.2.2 Respuesta transitoria bajo diferentes condiciones de cargas a escala variable.	74
2.6.4 Características estacionarias de Pila de Combustible PEM de la UEX.	74
2.6.4.1 Ensayos en modo estático con carga y sin carga externa.	75
CAPÍTULO 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	77
3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES	77
3.2 ALMACENAMIENTO DE DATOS	77
3.3 EXPOSICIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
3.3.1 Operación estática.	79
3.3.1.1 Relación entre la corriente de carga de la pila y la temperatura de operación del stack.	79
3.3.1.2 Distribución de temperaturas con/sin carga externa.	80
3.3.1.3 Uniformidad del voltaje a lo largo del stack sin carga externa y con carga externa.	81
3.3.1.3.1 Uniformidad de voltaje sin carga externa.	81
3.3.1.3.2 Uniformidad de voltaje con carga externa.	82
3.3.1.3.3 Comparativa de operación sin/con carga externa.	83
3.3.1.3.4 Comparativa de operación utilizando dos sistemas de medición sin carga externa.	85
3.3.1.3.5 Comparativa de operación utilizando dos sistemas de medición: UEX y CNH con carga externa.	88

3.3.1.4. Curva de polarización.	91
3.3.2 Comportamiento dinámico y respuesta transitoria.	92
3.3.2.1 Respuesta transitoria del voltaje y corriente de stack durante la secuencia de arranque de la pila.....	92
3.3.2.2. Respuesta transitoria del voltaje de 47 celdas en la secuencia de arranque (Startup). .	94
3.3.2.3 Respuesta transitoria del voltaje y corriente durante la secuencia de apagado de la pila.	95
3.3.2.4. Respuesta transitoria del voltaje de 47 celdas en la secuencia de parada (Shutdown). .	95
3.3.2.5. Respuesta transitoria del voltaje del stack ante variaciones de corriente de carga.	96
3.3.2.6. Respuesta transitoria del voltaje de celdas ante variaciones de corriente de carga.	97
3.3.2.7 Respuesta transitoria de la temperatura del stack ante variaciones de corriente de carga.	98
3.3.2.8. Respuesta transitoria de la temperatura de celdas ante variaciones de corriente de carga.	99
3.3.2.9. Respuesta transitoria del voltaje del stack y celdas ante incrementos de carga escalonados.	100
3.3.2.10. Respuesta transitoria del voltaje y corriente durante variación continua de la carga, sin paradas.	101
3.3.2.11 Respuesta transitoria del voltaje, corriente y estatus de purga durante variación de carga escalonadas.....	101
3.3.2.12 Validación de sistema de monitorización utilizando modelo matemático.	102
3.4. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS E INFERENCIALES	104
3.4.1. Estadísticos para operación con y sin carga externa.....	104
3.4.2 Estadísticos inferenciales comparativos entre sistema CNH y UEX.	106
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	108
4.1 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	108
4.2 TRABAJOS FUTUROS.....	111

ANEXOS

Anexo 1. Conexión de canales físicos en DAQ NI-USB 6225	2
Anexo 2. Configuración de señales de entrada a los dispositivos NI-USB6225, NI-USB 6218 y NI-USB 6008.	4
Anexo 3. Hoja característica de amplificador de aislamiento ISO 124P.	6
Anexo 4. Hoja característica de Traductor de corriente HTB-100	11
Anexo 5. Hoja característica de convertidor DC/DC A_S-1WR1	14
Anexo 6. Hoja característica de sensor de temperatura LM35	16
Anexo 7. Hoja característica de regulador de presión de la pila de combustible Nexa 1.2kW	21
Anexo 8. Hoja característica de diodo rectificador 1N400	25

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Oferta Total de Energía Primaria por recurso 1993, 2011 y 2020.	1
Figura 1.2. Aplicaciones de las pilas de combustible PEM: ((a) Portátil, (b) Aplicaciones para el transporte, (c) Estacionarias. Tomado de: “Departamento de Industria, Comercio y Turismo Dirección General de Energía y Minas”, 2006.....	2
Figura 1.3. Comparación de eficiencias de distintos sistemas de generación de energía eléctrica.	3
Figura 1.4. Esquema de una celda de combustible.	4
Figura 1.5. Disposición de los elementos básicos de una monocelda. Tomado de: “Estudio experimental de pilas de combustible tipo PEM” por José Alfredo Iranzo Paricio Ruíz, 2015, 20.	5
Figura 1.6. Stack de una Pila de combustible Ballard Nexa 1.2Kw: (a) Stack, (b) Celda unitaria (MEA). 6	
Figura 1.7. Curva típica de polarización (funcionamiento real) de una pila de tipo PEM.....	10
Tomado de: “Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM” por Barreras, M y Lozano, A., 2012, p.9.10	
Figura 1.8. Circuitos equivalentes de celda de combustible: (a) Circuito eléctrico equivalente de una celda de combustible ánodo y cátodo, (b) Circuito simplificado.....	15
Figura 1.9. Gráfico de una prueba típica de interrupción de corriente.	16
Figura 1.10. Respuesta de la impedancia a bajas y altas frecuencias. Tomado de: “Limitations of current interrupt (CI) method compared with electrochemical impedance spectroscopy”. 2016.	17
Figura 1.11. Señal de excitación en voltametría cíclica. Tomado de: Técnicas electro analíticas parte II voltamperometría de Ortíz Reynaldo, Martínez Yris y Hernández Ricardo. (2010), p.33.	18
Figura 1.12. Voltagrama obtenido por una voltametría cíclica. Se parte de un potencial de 200mV y se va hasta los -200mV. Las flechas indican la dirección de barrido. (2014).Tomado de: “Estudio de la corrosión electroquímica en los bronce de aluminio con níquel (NAB)”, de Alberto Rey Ruiz, 2014, p.17.	18
Figura 1.13. Convención utilizada para representar gráficos de voltagramas. Tomado de: “Practical Beginner’s Guide to Cyclic Voltammetry “ de Elgrishi, N., Rountree, K ., McCarthy, B., Rountree, E., Eisenhart,T y Dempsey, J. A., Journal of Chemical Education, 2018 , 95(2), p. 198, Copyright 2017 American Chemical Society and Division of Chemical Education, Inc.	19
Figura 1.14. Diagrama de Nyquist y circuito equivalente, para la representación de impedancias reales e imaginarias (R_{ct} : resistencia a la transferencia de carga, $R_{membrana}$: resistencia del electrolito o membrana, C_{dl} : capacitancia de la doble capa). electroquímica.	22
Figura 1.15. Enfoques en el diagnóstico de fallos. Adaptado de “Fault diagnosis methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System” de Benmouna, A., Becherif, M., Depernet,D., Gustin,F.,Ramadan,H.S.,Fukuhara,S, ScienceDirect, 2017, 42(2) pp. 1538, Copyright 2016 Hydrogen Energy Publications LLC.	24

Figura 2.1. Diagrama esquemático del sistema de monitorización multicanal.....	38
Figura 2.2. Conexionado de Fuentes Ep-603 para alimentar distintos elementos del sistema de monitorización multicanal.	39
Figura 2.3. Esquema de funcionamiento del Módulo Nexa Ballard.....	40
Figura 2.4. Apilamiento de MEAs que conforman el Stack de pila de combustible Ballard Nexa de 40 1.2Kw.	40
Figura 2.5. Elementos principales de Pila PEM NEXA.	41
Figura 2.6. Suministro de hidrógeno.....	42
Figura 2.7. Sistema de suministro del aire.....	43
Figura 2.8. Sistema de refrigeración	43
Figura 2.9. Tarjeta o placa electrónica de la pila de combustible.....	44
Figura 2.10. Bombona de hidrógeno comprimido utilizada para alimentar stack ballard Nexa 1.2Kw.....	45
Figura 2.11. Características físicas sensor LM 35.....	46
Figura 2.12. Conexión de LM 35: (a) Configuración de resistencia al LM-35, (b) Conexión de placa de resistencias al DAQ-NI-USB-6008.....	46
Figura 2.13. Sensor HTB 100-TP.....	47
Figura 2.14. Curva de calibración Sensor HTB 100-TP.	47
Figura 2.15. Sensor de presión: (a) Conexiones, (b) Montaje a la salida del regulador de presión. ...	48
Figura 2.16. Curva de calibración sensor de presión.	48
Figura 2.17. Módulos DAQ utilizados: (a) NI-USB 6008, (b) módulo NI-USB 6225, (b) módulo NI-USB 6218.	49
Figura 2.18. Diagramas de conexiones con los módulos de adquisición DAQ para medidas de voltajes: (a) Conexión diferencial para el módulo NI-USB 6008 (7 celdas), (b) Conexión diferencial para el módulo NI-USB 6225(40 celdas).	50
Figura 2.19. Conexión de sistemas d adquisición de datos (a) Dispositivos DAQ utilizados para la adquisición de datos (NI-USB (6225, 6218,6008)), (b) Configuración física de montaje de módulos..	51
Figura 2.20. Placa PCB acondicionador de señal (circuito con amplificador de aislamiento y convertidores DC-DC).....	52
Figura 2.21. Diseño de circuito electrónico en Altium Designer 17.1.....	52
Figura 2.22. Esquema de configuración del ISO 124P: (a) Señales de entrada y salida del ISO 124P, (b) Diagrama bloque de los componentes del ISO 124P.....	53
Figura 2.23. DC/DC Converter AS-1WR2.....	54
Figura 2.24. Módulos FZ0430: (a) Configuración del divisor de tensión, (b) conexión de divisores de tensión (entradas provenientes de celdas Vcc y Gnd) y salidas al DAQ NI-USB 6225 (A0 y Gnd).	55

Figura 2.25. Capacitores de desacoplo conectados a las fuentes de alimentación VCC y GND de los amplificadores de aislamiento y convertidores DC-DC.....	56
Figura 2.26. Diodo 1N4005: (a) Conexión de diodo a tarjeta de aislamiento, (b) Esquemático del diodo con sus polaridades.	57
Figura 2.27. Circuito eléctrico esquemático de dos secciones del sistema de acondicionamiento de señal.....	57
Figura 2.28. Configuración de conexiones de sensores a las fuentes de alimentación.....	58
Figura 2.29. Conexión de placas de aislamiento de masas a las salidas de los divisores de tensión y a las entradas analógicas del DAQ NI-USB-6225.	59
Figura 2.30. (a) Sistema de ventilación abatible para enfriamiento de componentes, (b) Montaje de placas en estructura con ventiladores	59
Figura 2.31. Pantalla principal del software NEXA OEM.....	60
Figura 2.32. Patrón productor/consumidor.....	61
Figura 2.33. Configuración de Productores para las entradas de cada uno de los DAQ del sistema de mediciones.....	62
Figura 2.34. Interface de Usuario para el seguimiento de las temperaturas, corriente y presión del H ₂ del Stack.....	63
Figura 2.35. Interface de Usuario para el seguimiento de las temperaturas, corriente y presión del H ₂ del Stack.....	63
Figura 2.36. Interface de Usuario para el seguimiento del voltaje generado por cada una de las 47 celdas del Stack.....	64
Figura 2.37. Indicadores de voltajes en celdas máximo y mínimo instantáneo.....	64
Figura 2.38. Diagrama de bloques control de presión de hidrógeno y adquisición de voltajes, corriente, temperaturas y presión del sistema Ballard Nexa- Pila 1.2kW.....	65
Figura 2.39. Partes del módulo de administración de potencia.....	64
Figura 2.40. Vista frontal del sistema integrado Heliocentris.....	65
Figura 2.41. Estructura del Sistema de Adquisición de Datos.....	65
Figura 2.42. Paneles de usuario de sistema de monitorización desarrollado y del sistema heliocentris.....	66
Figura 2.43. Representación en panel de usuario de voltaje del stack de nuestro prototipo y el obtenido mediante ecuación matemática.....	67
Figura 2.44. Equipamiento de pruebas para ensayos con el sistema de monitorización en tiempo real de la pila de combustible PEM 1.2kW.....	68
Figura 2.45. Área de trabajo de la carga electrónica Prodigit 3260.....	69

Figura 2.46. Carga electrónica Prodigit 32612, (b) Conexión de carga electrónica a sistema de control heliocentris.	70
Figura 2.47. Parámetros de medición del stack PEM.....	70
Figura 2.48. Configuración de equipos para ensayos con pila de combustible de UEX.	75
Figura 2.49. Configuración de medidas por secciones de 8 celdas en pila de combustible perteneciente a la UEX.....	76
Figura 3.1. Configuración de nombres, formato, encabezado y columnas de tiempo.....	78
Figura 3.2. Formato de tabla generada en Excel para almacenar los datos generados en los ensayos.	78
Figura 3.3. Perfiles de temperaturas como función de la corriente del stack.....	79
Figura 3.4. Temperaturas en cinco puntos del stack con/sin carga.....	80
Figura 3.5 Respuesta del voltaje en cada una de las 47 celdas de la pila Ballard Nexa sin carga externa.....	82
Figura 3.6. Respuesta del voltaje en cada una de las 47 celdas de la pila Ballard Nexa con carga externa de 5 A.	83
Figura 3.7. Perfiles de voltajes para cada una de la celdas de la pila de combustible Ballard Nexa, sin / con carga externa de 5 A y 10A.	84
Figura 3.8. Dispersión de voltajes para cada una de la celdas de la pila de combustible Ballard Nexa sin carga y con carga externa de 5 A.....	84
Figura 3.9. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas sin carga externa variando presión de regulador de entrada de H ₂ en pila UEX y aplicando 3 bar en pila CNH.....	85
Figura 3.10. Distribución de voltajes en 47 celdas sin aplicar carga externa utilizando presión de hidrógeno de 3.5 bar en la pila UEX y 3 bar en pila CNH.	86
Figura 3.11. Respuesta del voltaje en el tiempo en cada una de las 47 celdas de la pila Nexa Ballard (UEX) en operación sin carga externa.....	86
Figura 3.12. Dispersión de voltajes para cada una de las celdas de la pila de combustible de la UEX.	87
Figura 3.13. Respuesta del voltaje en el tiempo para cada una de las 47 celdas de la pila CNH sin carga externa.	87
Figura 3.14. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas sin aplicar carga externa para dos pilas de combustible (UEX y CNH).....	88
Figura 3.15. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas con carga externa variando presión de regulador de entrada de H ₂ en pila UEX y aplicando 3 bar en pila CNH.....	89
Figura 3.16. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas con carga externa para dos pilas de combustible UEX (3.5 bar) y CNH (3bar).....	89
Figura 3.17. Distribución de voltajes en 47 celdas con carga externa variando presión de regulador	

de entrada de H ₂ en pila UNEX (3.5 bar) y 3 bar en pila CNH.	90
Figura 3.18. Respuesta del voltaje en el tiempo aplicando carga externa (2.7A) en cada una de las 47 celdas en la pila UEX.	90
Figura 3.20. Curva de polarización de la pila de combustible CNH a presión de 2.5 bar y temperatura ambiente 28°C (R1, R2 y R3 representan las tres regiones de pérdidas).	92
Figura 3.21. Respuesta transitoria del corriente y voltaje del stack en la secuencia de arranque (códigos de estado: 0 (reposo); 1 (puesta en marcha); 2 (operación normal)).	93
Figura 3.22. Respuesta transitoria del corriente y voltaje en 47 celdas, para la secuencia de arranque (códigos de estado: 0 (reposo); 1 (puesta en marcha); 2 (operación normal)).	94
Figura 3.23. Comportamiento de voltaje y corriente del stack en la secuencia de apagado de la pila. (2-operación normal, 4- secuencia de parada, 0-reposo).....	95
Figura 3.24. Comportamiento de voltaje y corriente de cada una de las 47 celdas en la secuencia de apagado de la pila. (2-operación normal, 4- secuencia de parada, 0-reposo).	96
Figura 3.25. Respuesta transitoria del voltaje y la corriente del stack al aplicar dos escalones de carga (5 y 10 A).	97
Figura 3.26. Respuesta transitoria del voltaje en cada una de las 47 celdas de la pila nexa ballard (CNH) 1.2Kw para escalones de 5 y 10 A.	97
Figura 3.27. Respuesta transitoria del voltaje en una celda al aplicar escalones de 5 y 10 A.	98
Figura 3.28. Seguimiento de la temperatura del stack y ambiente al aplicar dos escalones de carga (5 y 10 A).	98
Figura 3.29. Respuesta de la temperatura del stack a escalones de carga (5 y 10 A).	99
Figura 3.30. Respuesta de la temperatura en celdas del stack a escalones de carga.	99
Figura 3.31. Respuesta transitoria del voltaje en celdas al aplicar 7 escalones de carga.	100
Figura 3.32. Respuesta transitoria del voltaje en celdas aplicando 7 escalones de carga.	100
Figura 3.33. Comportamiento de voltaje y corriente del stack ante variación de carga sin paradas.	101
Figura 3.34. Respuesta transitoria de corriente, voltaje del stack y estatus de purga en operación de carga sin paradas.	102
Figura 3.35. Respuesta transitoria de corriente, voltaje del stack y estatus de purga en operación de carga sin paradas.	104
Figura 3.36. Comparativa de la distribución de voltajes aplicando rangos de corriente de carga externa.	105
Figura 3.37. Diagrama de caja comparativo entre sistema CNH y UEX	107

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Comparación de las celdas de combustible con otros sistemas de generación eléctrica.....	3
Tabla 1.2. Características de distintos tipos de celdas de combustible.....	6
Tabla 3.1. Diferencias comparativas de temperaturas a lo largo del stack (celdas 1, 11, 23,34 y 47).	81
Tabla 3.2. Diferencias comparativas de temperaturas al aplicar escalones de carga.	81
Tabla 3.3. Estadísticos descriptivos de operaciones con carga y sin carga externa (CNH).....	104
Tabla 3.4. Análisis de significancia para diferencias entre los promedios de operación sin/con carga para pila CNH.....	105
Tabla 3.5. Estadísticos descriptivos de operaciones con dos sistemas de medición UEX y CNH.	106
Tabla 3.6. Resumen de prueba de hipótesis aplicada a la diferencia entre valores de ambos sistemas (CNH y UEX).....	107

NOMENCLATURA

H_2	Hidrógeno
E°	Potencial ideal estándar (1 atm y 25°C)
E	Potencial ideal de la celda (circuito abierto)
P_{H_2}	Presión de hidrógeno
P_{H_2O}	Presión de agua
P_{O_2}	Presión de oxígeno
RT	R es la constante universal de los gases ideales y T es la Temperatura absoluta
F	Constante de Faraday
E_r	Potencial de referencia
i_0	Densidad de corriente de intercambio
$k_{0,f/b}$	Coeficiente de velocidad de reacción en el sentido de reducción
C_{ox}, C_{red}	Concentración superficial de las especies reactivas
R_{elec}	Resistencia eléctrica
R_{ionic}	Resistencia iónica
A_{cell}	Superficie activa de la pila de combustible
δ_{Nat}	Grosor de la membrana polimérica de Nafión
$n_{consumido}$	Moles de reactivo consumidos

i	Densidad de corriente
n	Número de electrones (número de electrones/moles de especie de interés)
F	Constante de Faraday
A	Superficie
i_L	Densidad de corriente límite
V_{Poros}	Volumen total de poros
V_C	Volumen total de poros de una muestra
Q	Caudal volumétrico
k	Permeabilidad del medio poroso
A	Área/superficie
μ	Viscosidad del fluido
L	Distancia a través de medio poroso
P_{hum}	Masa de muestra húmeda
$P_{sec,f}$	Masa de muestra seca después de humectar
$P_{sec,0}$	Masa de muestra seca
$\%A_A$	Gramos de agua por gramos de muestra
l	Espesor de la membrana
S	Superficie de la membrana
$R_{membrana}$	Resistencia de la membrana
V	Volumen o voltaje
R_{ct}	Resistencia a la transferencia de carga
C_{dl}	capacitancia de la doble capa
M	Concentración de NaOH.
W	Peso de la muestra seca.
R_{ohm}	Resistencia debido a las pérdidas óhmicas
T_{st}	Temperatura del stack
V_{fc}	Voltaje de stack o pila
α	Coefficientes de transferencia de carga (reducción y oxidación)
σ	Conductividad protónica
i_{pa}	Corriente pico anódica
i_{pc}	Corriente pico catódica

ACRÓNIMOS

GDL	Capa difusora de gas
PTFE	Teflón
MEA	Membrane electrode assembly
PEMFC	Polymer electrolyte membrane fuel
AFC	Alkaline fuel cell
PAFC	Phosphoric acid fuel cells
MCFC	Molten-carbonate fuel cells
DMFC	Direct-methanol fuel cells
SOFC	Solid oxide fuel cell
EIS	Impedance electrochemical spectroscopy
CV	Voltametría cíclica
SEM)	Microscopía de barrido
TEM	Microscopía electrónica de transmisión
IEC	Capacidad de intercambio iónico
CG	Gas chromatography
MRI	Resonancia magnética
IA	Inteligencia artificial
ARR	Relaciones de redundancia analítica
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
XRD	X-ray diffraction
SEM	Scanning electron microscopy
CFD	Computational fluid dynamics
DAQ	Data acquisition system
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
CVC	Cell voltage check
RSE	Referenced single ended

CR Control de resistencia de carga

LabView Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

1.1 Introducción

Una problemática mundial que está causando consecuencias devastadoras para el medio ambiente, así como aumentos en la temperatura media del planeta, es la emisión de gases contaminantes que producen el llamado efecto de invernadero. En el más reciente reporte del consejo Mundial de Energía (World Energy report, 2019) se indica que a pesar de que se continúan haciendo esfuerzos por impulsar otros tipos de energías menos contaminantes, todavía la demanda de combustible fósil sigue siendo mayor, como se muestra en la figura 1.1. Por su parte, la (Comisión Europea, 2020) indica que las emisiones de carbono crecieron un 2.0% para finales del 2018, el crecimiento más rápido en siete años.

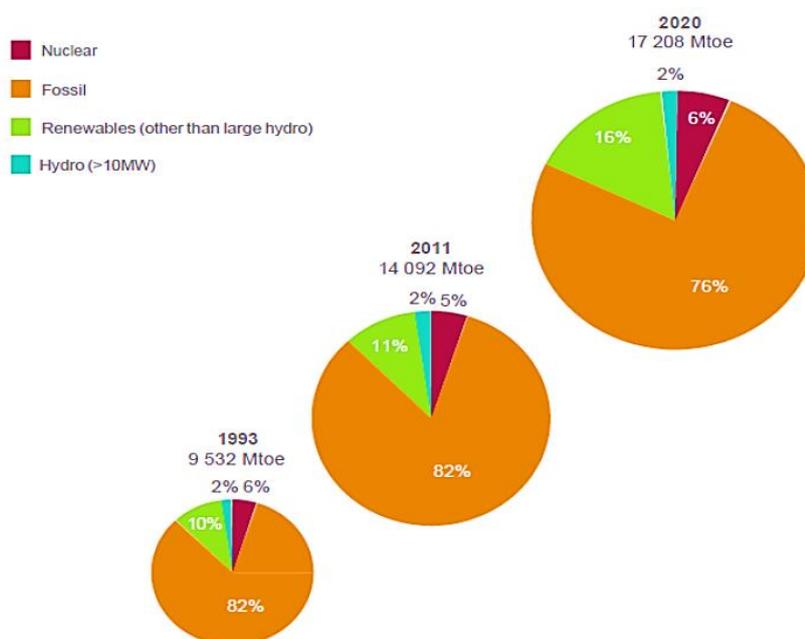


Figura 1.1. Oferta Total de Energía Primaria por recurso 1993, 2011 y 2020. Tomado de: “Recursos energéticos globales”, 2013, 23, 8, copyright © 2013 World Energy Council.

A raíz de esta problemática, se han elaborado estrategias para ayudar a reducir estos efectos. Es así que en el año 2013 (DG Clima), se acordó reducir a un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero, así como mejorar la eficiencia energética en el uso de la energía e incentivar que los países de la Unión Europea utilicen un 20% de fuentes de energías renovables para su demanda energética anual.

Para lograr estos objetivos, se hace urgente adoptar y estudiar alternativas basadas en energías renovables que permitan una producción de energía limpia, eficiente para el abastecimiento de energía eléctrica a medio y largo plazo, como, por ejemplo, la tecnología de pilas

de combustible que, como bien indica (Calderón, 2010), son sistemas electroquímicos que utilizan hidrógeno y oxígeno para producir energía eléctrica y se basan en una reacción de óxido-reducción en la que el hidrógeno actúa como combustible y circula por el ánodo (electrodo negativo), mientras que un oxidante, generalmente oxígeno o aire, se alimenta continuamente en el cátodo (electrodo positivo).

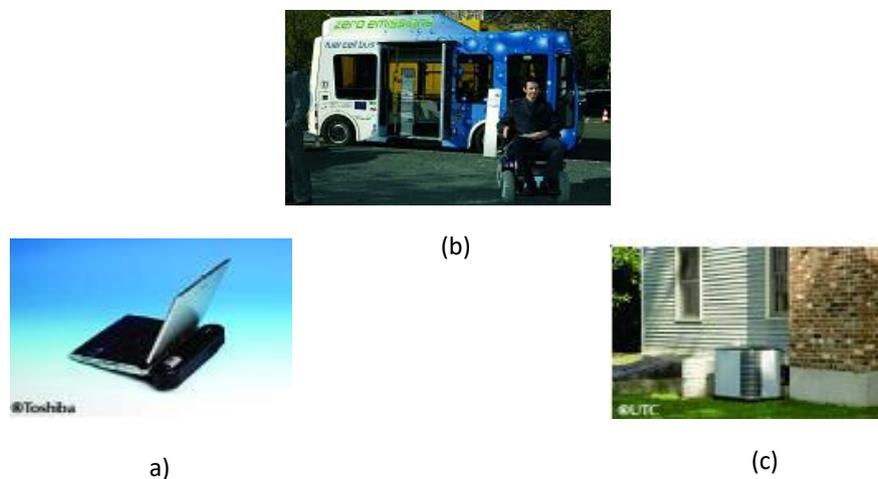


Figura 1.2. Aplicaciones de las pilas de combustible PEM: (a) Portátil, (b) Aplicaciones para el transporte, (c) Estacionarias. Tomado de: "Departamento de Industria, Comercio y Turismo Dirección General de Energía y Minas", 2006.

Esta tecnología ha llamado la atención por ser una forma de generación sin emisiones tóxicas, ya que su único residuo es agua y calor, por lo que ayuda en gran medida a reducir las emisiones de gas de efecto de invernadero y, por ende, a conservar el medio ambiente. Por otro lado, como indican (de Blas et al., 2006), estos sistemas tienen una variedad de aplicaciones en ordenadores portátiles, aplicaciones celulares y transporte. Algunas de ellas se muestran en la figura 1.2.

Si se hace una comparación en el aspecto de eficiencia de conversión de energía, como indica (Cook, 2001), estos sistemas pueden competir con otras formas de producción de energía, ya que a pesar de que existen pérdidas asociadas al calentamiento de las celdas en el proceso de transferencia de energía química a energía eléctrica, presentan alta eficiencia. (Cabot & Alcaide, F and Brillas, E, 2013) señalan que la eficiencia de las celdas es, en aproximación, el doble de la de los motores térmicos, debido a que estos últimos se ven afectados por las limitaciones establecidas por el Teorema de Carnot, en los que el proceso de generación incluye un proceso térmico o mecánico intermedio, como se muestra en la tabla 1.1 y en la figura 1.3:

Tabla 1.1.

Comparación de las celdas de combustible con otros sistemas de generación eléctrica

	Motor alternativo: diésel	Generador de turbina	Fotovoltaica	Turbina de viento	Celda de combustible
Rango de capacidad	500kW-50MW	500kW-5MW	1kW-1MW	10kW-1kW	200kW-2MW
Eficiencia	35%	29-42%	6-19%	25%	40-85%
Costo de capital (\$/kW)	200-350	450-870	6600	1000	1500-3000
Costo de operación y mantenimiento (\$/kW)	0.005-0.015	0.005-0.0065	0.001-0.004	0.01	0.0019-0.0153

Nota. Recuperado de “Estudio comparativo de las diferentes tecnologías”, por Alvarado Flores, José, 2013, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52, p2.

Por otro lado, (Flores, 2013) revela que no todo es positivo en cuanto a la utilización de pilas de combustible, debido a que existen limitaciones causadas por impurezas en los gases de alimentación, en la densidad de potencia por unidad de volumen, accesibilidad y durabilidad. De allí la importancia del estudio de estos sistemas para llevar a cabo correctivos y desarrollar nuevos materiales que ayuden a mejorar las prestaciones al momento de su uso.

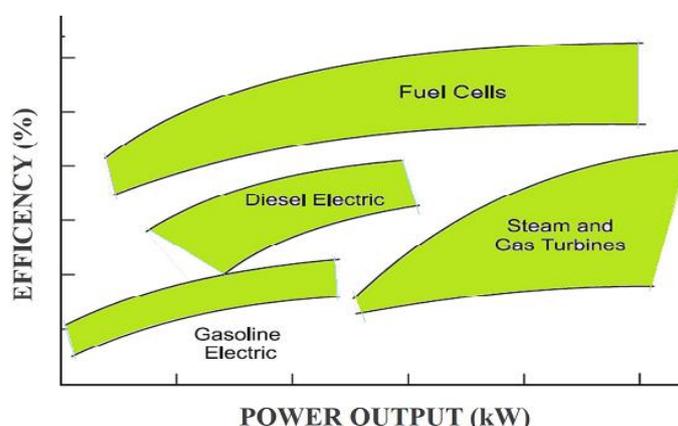


Figura 1.3. Comparación de eficiencias de distintos sistemas de generación de energía eléctrica. Tomado de: “Graphene and Graphene Oxide for Fuel Cell Technology” por R. Yadav, A. Subhash, N. Chemmenchery, B. Kandasubramanian, 2018, *Industrial and engineering chemistry research*, 57, p. 4, Copyright by American Chemical Society.

1.2 Principio básico de funcionamiento

Para poder definir una pila de combustible es necesario hacer referencia a la unidad que la conforma, que es la celda unitaria. De manera general, la celda unitaria está compuesta por dos placas bipolares, una capa de difusión de gases y dos electrodos (ánodo y cátodo), separados por una membrana de electrolito de material polímero, denominada membrana de intercambio de

protones. Los electrodos o placas están recubiertos en un lado con un catalizador. El combustible de hidrógeno se alimenta en el ánodo y el aire entra por el cátodo.

Los electrones de la molécula de hidrógeno fluyen a través de un circuito externo, creando la corriente eléctrica. Los protones de la molécula de hidrógeno se transportan a través de la membrana del electrolito y se combinan en el cátodo con los electrones y el oxígeno del aire para formar agua y generar calor, como se muestra en la figura 1.4:

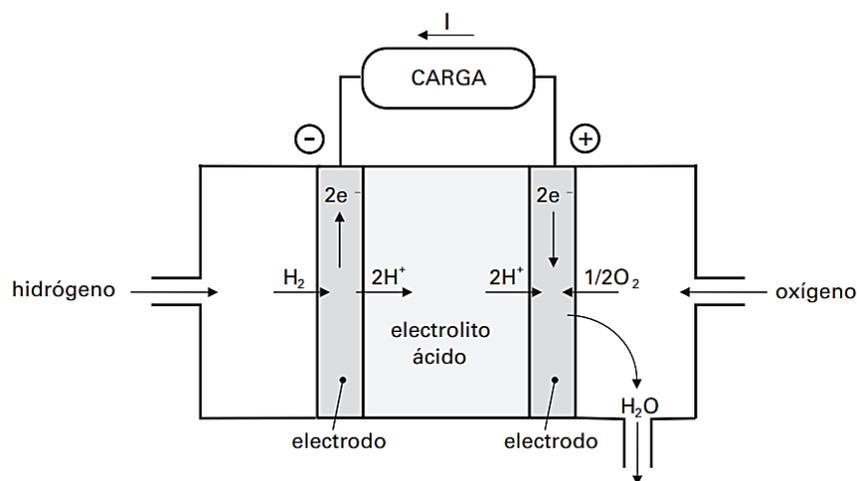
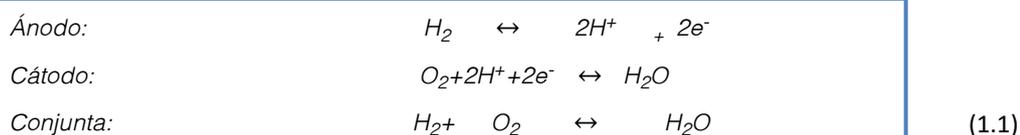


Figura 1.4. Esquema de una celda de combustible. Tomado de: "El hidrógeno. Fundamento de un futuro equilibrado" por M. Aguer Hortal y A. L. Miranda, 2012, 2da edición, p. 106.

Estos dispositivos, por ser de naturaleza electroquímica, necesitan de una reacción química que libere electrones y se produzca una corriente eléctrica. Para esto se necesita alimentar al cátodo (en las pilas de hidrógeno) de oxígeno y al ánodo de hidrógeno, con el fin de producir una reacción de oxidación-reducción en donde ambos reactivos reaccionan de forma separada en cada electrodo, como se muestra a continuación:



1.3 Componentes

Las pilas de combustible están conformadas por cuatro componentes principales. El primero son las placas bipolares, hechas típicamente de grafito o metálicas, y se encargan de distribuir los reactantes y transportar los electrones entre celdas y a los electrodos. El segundo componente es la capa de difusión de gases o GDL (Gas Diffusion Layer), que está construida de un material poroso y

conductor y colocada entre la placa bipolar y los electrodos. En el cátodo, la GDL se suele tratar con un material hidrófobo (teflón, PTFE) para facilitar la evacuación del agua líquida generada en la reacción.

En el electrodo o capa catalítica se producen las reacciones electroquímicas de oxidación del hidrógeno y reducción del oxígeno. Normalmente, a los electrodos se les conoce como capa catalítica, y están localizados entre la superficie de la membrana y de la GDL, en ambos compartimentos anódico y catódico, respectivamente. Se trata de una fina capa de alrededor de 10 μm , con una carga de catalizador (ya sea platino u otro), que puede estar depositada tanto sobre la superficie de la membrana como en la GDL (Cortés, 2018).

Por último, está la membrana de intercambio de protones que se encuentra ubicada en medio de los anteriores elementos y permite el transporte de protones desde el ánodo al cátodo. La zona del electrodo o zona catalizadora forma, junto con la membrana de intercambio protónico, la configuración denominada “MEA”, que no es más que las siglas en inglés: Membrane Electrode Assembly. Todo lo anterior se ilustra en la figura 1.5:

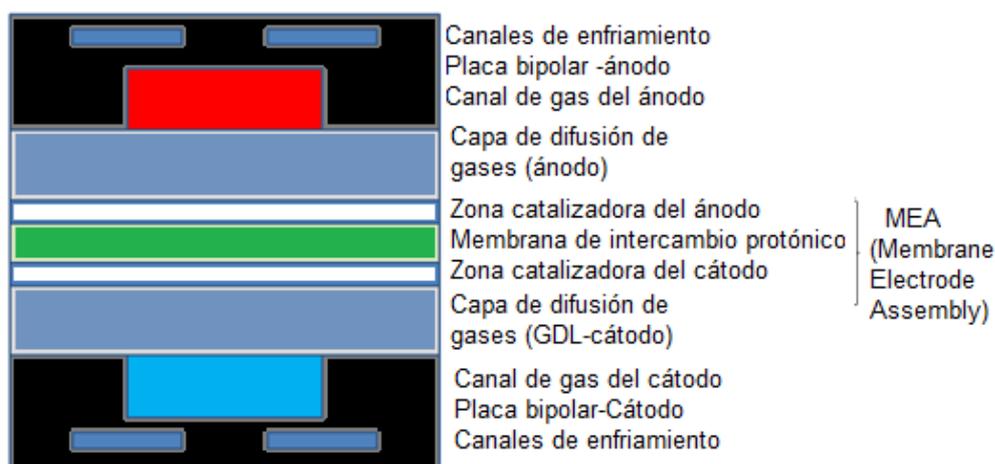


Figura 1.5. Disposición de los elementos básicos de una monocelda. Tomado de: “Estudio experimental de pilas de combustible tipo PEM” por J. A. Iranzo y P.(Ruíz, 2015), 20.

De manera general, una pila de combustible, como su nombre indica, es la unión o apilamiento de varias celdas individuales interconectadas entre sí, configuración que se denomina “Stack”, tal como se muestra en la figura 1.6 (a) y (b). Esta configuración tiene como objetivo conseguir una mayor cantidad de potencia y capacidad de producir energía. Por otro lado, además de contener el stack, la pila está conformada por elementos auxiliares que permiten la entrada del combustible, aire de refrigeración, extracción e impurezas, entre otros.

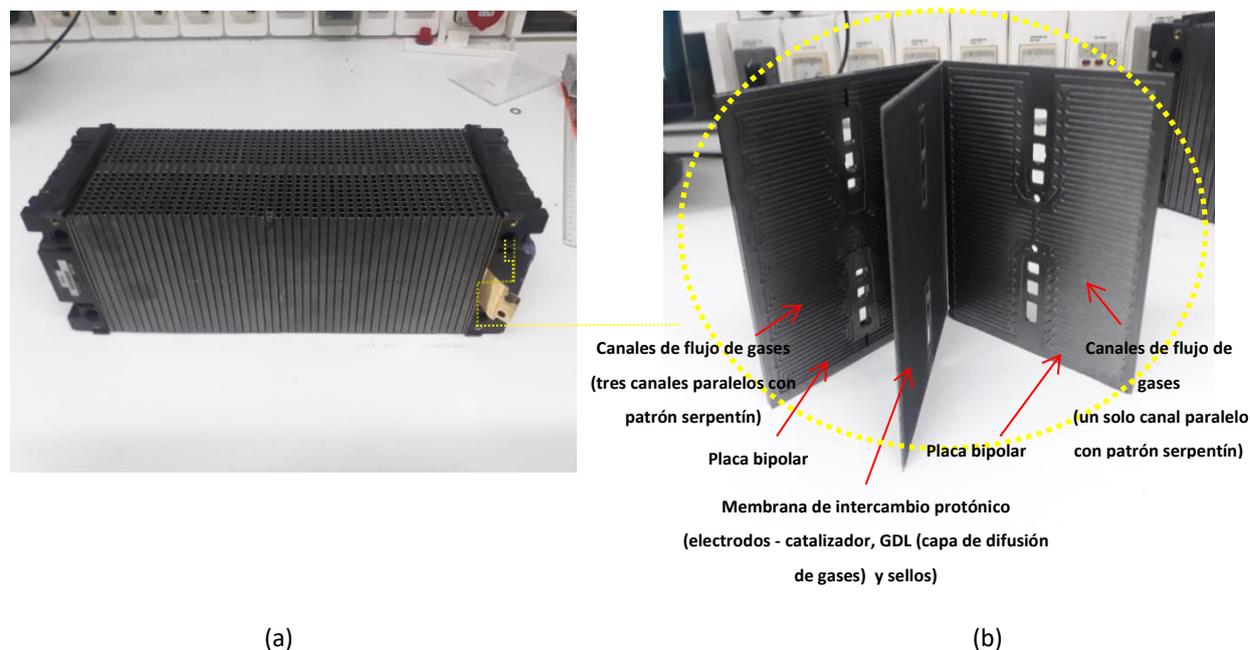


Figura 1.6. Stack de una Pila de combustible Ballard Nexa 1.2Kw: (a) Stack, (b) Celda unitaria (MEA).

1.4 Clasificación de pilas de combustible

Se han desarrollado diferentes tipos de celdas de combustible que se pueden agrupar dependiendo de varios factores, entre los cuales están la temperatura de operación, el tipo de electrolito y el combustible, como se muestra en la tabla 1.2:

Tabla 1.2.

Características de distintos tipos de celdas de combustible

	PEMFC	AFC	PAFC	SOFC	MCFC	DMFC
Electrolito	Membrana de polímero sólido	Solución alcalina	Ácido fosfórico	Óxido Sólido	Carbonatos Fundidos	Membrana de Polímero Sólido
Rango de potencia	5-250kW	5-150kW	50kW-11MW	100-250kW	100kW-2MW	5kW
Ventajas	Baja temperatura Arranque rápido baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H ₂ impuro	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación Eléctrica distribuída y calor	Generación Eléctrica distribuída y calor	Generación eléctrica distribuída y calor	Portátiles

Nota. Tipos de pilas de combustible. Adaptada de <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>.

Copyright 2018 de Centro Nacional de Hidrogeno.

1.4.1 Pilas de combustible de intercambio protónico (PEMFC)

Las pilas PEMFC se caracterizan por tener un electrolito en forma de fina membrana de polímero Nafión o hidrocarbonada, cuyo rasgo principal es el de no conducir la electricidad. Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico funcionan a baja temperatura entre 60 y 100⁰ C (Centro de Estudios Energías Renovables (CEER), 2017a).

1.4.2 Pilas de combustible alcalinas (AFC)

Las pilas de combustible alcalinas (AFC) fueron unas de las primeras pilas de combustible en ser desarrolladas. Estas pilas de combustible utilizan una disolución de hidróxido de potasio en agua como electrolito y pueden usar una gran variedad de metales no preciosos como catalizadores en el ánodo y el cátodo. Las AFC de altas temperaturas pueden funcionar a temperaturas entre 100 y 250⁰ C; no obstante, existen diseños de estas pilas que funcionan a temperaturas más bajas, entre 23 y 70⁰ C, aproximadamente (Lara, 2006).

1.4.3 Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

Las PAFCs fueron las primeras pilas de combustible comerciales. El electrolito es ácido fosfórico puro, la matriz usada para fijar el ácido es carburo de silicio, y el catalizador es platino tanto en el ánodo como en el cátodo. Las eficiencias pueden llegar hasta un 80% en el caso de co-generación de energía eléctrica por vapor de agua. A temperaturas bajas, el ácido fosfórico es un pobre conductor iónico y el envenenamiento por CO del Pt en el ánodo es muy importante (Peña, Pérez, Ruiz, & Núñez, 2006).

Este tipo de generador electroquímico puede producir electricidad con una eficiencia del 40%, de manera que se puede utilizar el vapor obtenido para cogeneración, como se ha mencionado. Las PAFC funcionan en un rango de temperaturas de entre 150 y 220⁰ C, ya que a temperaturas inferiores el electrolito no conduce bien los iones (Martínez, S., 2016).

1.4.4 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)

Son pilas de muy poca duración debido a que las altas temperaturas de operación causan daño a sus componentes y operan a altas temperaturas entre 600 y 650⁰C. Otra característica interesante de estas pilas es que no necesitan de un reformador externo para la conversión de combustibles en hidrógeno.

Asimismo, el electrolito que utilizan está compuesto por una mezcla de sales de carbonato

fundido dispersas en una matriz cerámica porosa y químicamente inerte de óxido de litio-aluminio. Estas pilas pueden tener un rendimiento de aproximadamente el 60%. Cuando el calor que se desprende es captado y utilizado, el rendimiento total puede ser de hasta un 85% (Pérez & Pérez, 2012).

1.4.5 Pilas de combustible de metanol directo (DMFC)

La mayoría de las pilas de combustible funcionan con hidrógeno, que se puede suministrar directamente en el sistema de la pila o generarse dentro de la propia pila, convirtiendo combustibles ricos en hidrógeno (como por ejemplo el metanol, etanol y los combustibles de hidrocarburos). Sin embargo, las pilas de combustible de metanol directo (DMFC) funcionan con metanol puro mezclado con vapor de agua suministrado directamente al ánodo de la pila (Mosa, 2008).

1.4.6 Pilas de combustible de Óxido Sólido (SOFC)

El electrolito convencional es generalmente constituido de zirconia estabilizada con itria (ZEI) para garantizar su estabilidad estructural (tenacidad ante fracturas) y el ánodo convencional está compuesto de una mezcla de ZEI y óxido de níquel. A su vez, el cátodo convencional está compuesto de manganita de lantano. Las pilas de combustible de óxido sólido poseen un electrolito denso, normalmente de espesor mayor a 150 μm , lo cual causa pérdidas óhmicas asociadas a la conducción de los iones O^{2-} desde el cátodo hasta el ánodo, a través del electrolito, que compromete la magnitud de la densidad de potencia producida (Tajiri, Karani, & Shrivastava, 2018).

1.5 Ventajas y desventajas

Algunas de las ventajas que se obtienen de la utilización de pilas de combustible son su alta eficiencia en comparación con otras formas de conversión de energía y su bajo nivel de contaminación ambiental. Además, su versatilidad y carácter modular permiten ampliar los requerimientos de potencia.

En el aspecto de mantenimiento, como se ha indicado, cualquier combustible que contenga hidrógeno es apto para el reformado y su utilización en estos sistemas. Los combustibles admitidos varían, pueden ser gaseosos como gas natural, GLP y carbón gasificado; combustibles refinados, como gasolina o diésel; y otros combustibles orgánicos como metanol y etanol. El oxígeno será el segundo reactante y se toma usualmente del ambiente. Por último, no se requieren de complejas infraestructuras para su instalación (Centro de Estudios Energías Renovables (CEER), 2017b).

Entre las desventajas se pueden mencionar la sensibilidad hacia contaminantes como el azufre (que se encuentra en el gas natural del reformado), el CO_2 , así como amoníaco, metales

alcalinos, partículas e hidrocarburos pesados. Todo esto conlleva ciertos requisitos de mantenimiento y filtrado de los flujos de hidrógeno y oxígeno, ya que los contaminantes pueden provocar el mal funcionamiento de la celda de combustible (Martínez, S., 2016).

Uno de los principales inconvenientes es la producción y almacenamiento del hidrógeno, ya que el proceso de producción suele ser costoso y su baja densidad volumétrica, en comparación con la gasolina, hace difícil su almacenamiento. Al tratarse de una tecnología en desarrollo, su precio no puede competir con el de las tecnologías convencionales (zubizarreta, 2009).

1.6 Funcionamiento ideal de una celda de combustible

El funcionamiento ideal de una celda de combustible depende de las reacciones electroquímicas que ocurren entre los diferentes combustibles y el oxígeno. En el caso de una celda tipo PEM, este viene definido por la ecuación 1.1.

El funcionamiento ideal de una pila se puede definir por su potencial de Nernst, representado como el voltaje de la celda. La ecuación de Nernst para la reacción total de una pila tipo PEM es el representado por la ecuación 1.2:

$$E = E^{\circ} \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln[P_{H_2}/P_{H_2O}] + \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln[P_{O_2}] \quad (1.2)$$

E = potencial ideal de la celda (circuito abierto).

E° = potencial ideal estándar (1atm y 25⁰ C).

P_{H_2} = presión de hidrógeno.

P_{H_2O} = presión de agua.

P_{O_2} = presión de oxígeno.

RT = R es la Constante universal de los gases ideales de valor 0,082 atm*litro/(mol K) y T es la Temperatura absoluta (en grados Kelvin).

F = F es la constante de Faraday cuyo valor es 96487⁹C/mol de e-.

Esta ecuación proporciona una relación entre el potencial ideal estándar E° donde el superíndice ⁰ indica condiciones estándar (1atm y 25⁰ C) para la reacción de la celda y el potencial ideal de equilibrio (E) a otras temperaturas y presiones parciales de productos y reactivos.

1.7 Funcionamiento real de una celda de combustible (cuantificación de las pérdidas)

Cuando una celda es alimentada con combustible y oxidante, pero se mantiene abierto el circuito externo o se opera sin carga externa, cabría esperar que su potencial fuese igual al teórico.

En cambio, se observa que el potencial en ese caso es mucho más bajo, incluso inferior a 1V. Esto indica que, incluso sin corriente externa, se producen pérdidas en la celda. Al cerrar el circuito, alimentando —por ejemplo, una resistencia—, el voltaje cae aún más (Moreno Rodríguez & González Fernández de Castro, 2016).

Estas caídas de voltaje en la celda se deben a pérdidas de diversa naturaleza:

- Cinética de las reacciones electroquímicas
- Resistencia interna: eléctrica e iónica
- Dificultades de abastecimiento en las zonas de reacción
- Corrientes internas
- Fuga de reactivos (Moreno Rodríguez, 2016)

Por lo anterior, se pueden definir tres tipos de pérdidas en estos sistemas:

- Pérdidas por activación: debidas a la baja velocidad de las reacciones en la región de polarización por activación.
- Pérdidas óhmicas (resistivas): relacionadas con el flujo de electrones a través del material de los electrodos, así como a la resistencia al flujo de iones a través del electrolito en la región de polarización óhmica.
- Pérdidas por concentración: los cambios de concentración del gas o transporte de masas se dan en la región de polarización por concentración.

Estas pérdidas se muestran en la figura 1.7:

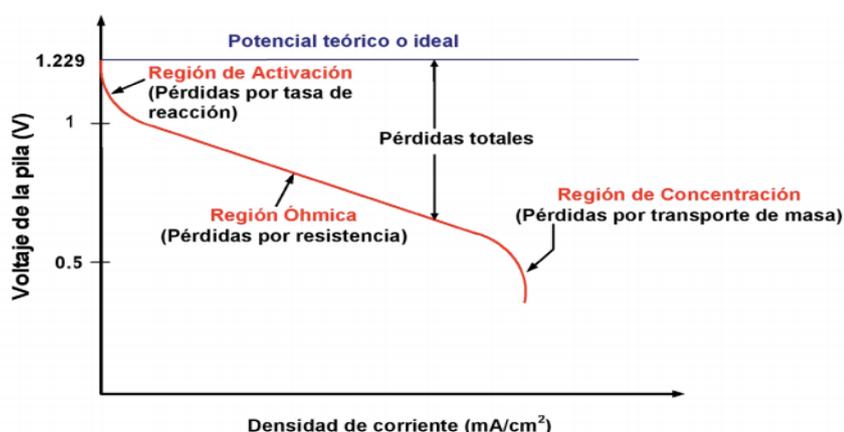


Figura 1.7. Curva típica de polarización (funcionamiento real) de una pila de tipo PEM. Tomado de: “Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM” por M. Barreras y A. Lozano, 2012, p. 9.

1.7.1 Pérdidas por activación

Para obtener una corriente en el circuito externo, se necesita una diferencia de potencial de los electrodos respecto a su potencial teórico. Esto es debido a que el potencial teórico representa la tensión de equilibrio, para la cual, la reacción electroquímica se produce a igual velocidad en las dos direcciones, obteniendo como consecuencia una corriente neta nula.

La densidad de corriente en función de la diferencia entre el potencial de funcionamiento de la celda y el potencial teórico, se expresa con la ecuación de Butler-Volmer, que deriva de las ecuaciones cinéticas de la reacción electroquímica en ambas direcciones:

$$i = i_0 \cdot \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_{red} F (E - E_r)}{RT} \right] - \exp \left[\frac{\alpha_{ox} F (E - E_r)}{RT} \right] \right\} \quad (1.3)$$

$\alpha \equiv$ Coeficientes de transferencia de carga (reducción y oxidación)

$F \equiv$ Constante de Faraday

$E_r \equiv$ Potencial de referencia (0V en el ánodo y 1.229V en el cátodo, 25° y 1 atm)

$i_0 \equiv$ Densidad de corriente de intercambio (velocidad para alcanzar el equilibrio)

$$i = nF K_{0,f} C_{ox} \exp \left[\frac{-\alpha_{red} F E_r}{RT} \right] = nF K_{0,b} C_{red} \exp \left[\frac{\alpha_{ox} F E_r}{RT} \right] \quad (1.4)$$

$k_{0,f/b} \equiv$ Coeficiente de velocidad de reacción en el sentido de reducción (forward)/oxidación(backward)

$C_{ox}, C_{red} \equiv$ Concentración superficial de las especies reactivas

Esta diferencia de potencial respecto al equilibrio es conocida como polarización de activación. Cuanto mayor es la densidad de corriente intercambiada, menores son las pérdidas por activación (Moreno Rodríguez & González Fernández de Castro, 2016).

1.7.2 Pérdidas óhmicas

Este tipo de pérdidas van directamente asociadas, en general, a la resistencia eléctrica, por lo cual también se las suele denominar Polarizaciones Óhmicas, y contribuyen a ello, tanto la parte eléctrica (R_{elec}) como la parte iónica (R_{ionic}).

$$\Delta V_{ohmic} = I \cdot R_{ohmic} = I \cdot (R_{elec} + R_{ionic}) \quad (1.5)$$

El término $R_{i_{\text{onic}}}$ domina en la ecuación anterior, ya que, por norma general, el transporte de carga a través de la membrana de intercambio de protones es más complicado que la circulación de electrones a través del resto de la pila de combustible (electrodos catalizados, capas de difusión, conexión externo y unión entre celdas).

Para poder evaluar correctamente las pérdidas resistivas, hay que tener en cuenta la conductividad de los materiales y, para el caso de las pilas PEM, el contenido en humedad de su membrana de intercambio de protones.

La polarización resistiva depende en su mayoría de la conductividad iónica del electrolito, con lo que estas pérdidas se pueden expresar mediante la siguiente expresión (Almarza, 2010):

$$\Delta V_{ohmic} = I \cdot R_{ohmic} = iA_{cell} \cdot \left(\frac{\delta_{Nat}}{\sigma A_{cell}} \right) = \frac{i\delta_{Nat}}{\sigma} \quad (1.6)$$

Donde:

- A_{cell} es la superficie activa de la pila de combustible (cm²).
- δ_{Nat} es el grosor de la membrana polimérica de Nafión (cm).

1.7.3 Pérdidas de Concentración (V_{con})

Las llamadas pérdidas por concentración son causadas por una reducción de la concentración de las especies reactantes en la superficie de los electrodos. En la superficie de estos, se consumen combustible y oxidante a un ratio que viene determinado por la ley de Faraday (Ecuación 1.7):

$$n_{consumido} = \frac{i \cdot A}{n \cdot F} \quad (1.7)$$

Siendo:

$n_{consumido}$: moles de reactivo consumidos (mol s⁻¹)

i : densidad de corriente (Acm⁻²)

n : número de electrones (número de electrones/moles de especie de interés)

F : constante de Faraday (96485 C eq⁻¹)

A : Superficie (cm²)

La concentración en la superficie del catalizador llega a cero cuando el ratio de consumo excede al ratio de difusión, es decir, los reactivos son consumidos antes de que alcancen la superficie

del catalizador. La densidad de corriente a la cual sucede esto es denominada densidad de corriente límite (i_L) (Díaz Pérez, 2015).

La polarización por concentración se define mediante la siguiente expresión:

$$AV_{conc} = \frac{R.T}{n.F} \cdot \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (1.8)$$

Siendo:

n : número de electrones por molécula de (2 electrones por molécula)

i_L : Densidad de corriente límite ($A\ cm^{-2}$)

1.8 Caracterización de pilas de Intercambio protónico

La caracterización de pilas de combustible, como indican (Frensch, Olesen, Araya, & Kær, 2018), incluye la verificación de las propiedades más destacadas de estos sistemas: físicas, químicas y eléctricas; con el objetivo de realizar correctivos para mejorar el rendimiento y la durabilidad.

Esta verificación se da en la celda o stack, tanto a nivel micro —en donde se distinguen las características morfológicas y químicas de las mismas—, como a nivel macro, donde se realiza una caracterización de rendimiento, es así que se pueden dividir según (Olivier, 2008) en:

1. Rendimiento general (curva j-V, densidad de potencia)
2. Propiedades cinéticas
3. Propiedades óhmicas (Rohmic, resistencias)
4. Propiedades de transporte masivo
5. Pérdidas parasitarias (fuga, reacciones secundarias, cruce de combustible)
6. Estructura electrolítica (porosidad, tortuosidad, conductividad)
7. Estructura del catalizador (espesor, porosidad, carga de catalizador, tamaño de partícula, área de superficie activa, conductividad iónica, conductividad eléctrica)
8. Estructura de flujo (caída de presión, distribución de gas, conductividad)
9. Generación de calor / balance de calor
10. Problemas de por vida (pruebas de por vida, degradación, ciclos, inicio / apagado, falla, corrosión, fatiga)

1.8.1 Tipos de caracterización

Existen muchas vertientes en cuanto a la clasificación de las técnicas de caracterización de las pilas de combustible, cuya importancia radica en conocer a fondo el comportamiento, rendimiento y características más relevantes.

Sobre este punto, (Meyer, Zeng, & Zhao, 2019) clasifican estos procesos como *in situ* cuando son realizados a la pila, celda o a alguno de sus componentes con el sistema apagado. Los denominan como modo *in operando* cuando la pila está en modo normal de operación. Sin embargo, la mayor parte de la literatura clasifica estas técnicas como las definen Bezmalinovic, Dario, Simic & Barbir (2015), quienes denominan *in situ* a las técnicas que se realizan con el sistema en arranque y *ex situ* a las que se realizan a alguno de sus componentes, celda o stack en parada.

De manera general, y tomando en cuenta la definición de (Olivier, 2008), el estudio de las características de las pilas de combustible, se puede dividir en dos tipos: *in situ* y *ex situ*. Las técnicas *in situ* se realizan con el stack o celda en modo normal de operación, de manera tal que se pueden observar sus características en tiempo real, englobando distintas variables a conocer, como el voltaje, corriente y tiempo, a diferencia de las técnicas *ex situ*, en las cuales es necesario extraer cualquier componente del stack o de las celdas para realizar su estudio de manera individual y analizar de manera detallada la estructura y propiedades de los componentes.

Cada una de estas técnicas tiene sus ventajas y desventajas, como indican Bezmalinovic, Dario, Simic & Barbir (2015), los métodos *ex situ* son útiles para aumentar el conocimiento sobre lo que le sucede a la pila de combustible y sus componentes, pero solo los métodos *in situ* son los que pueden aplicarse para tomar acciones correctivas por un sistema de control.

Las técnicas de caracterización electroquímica *ex situ* son aquellas en las que se extraen elementos o componentes de las celdas o stack y, por tener un procedimiento algo invasivo, pueden causar alteraciones en los materiales que componen estos sistemas, y, por lo tanto, alterar su funcionamiento durante la operación (Yao et al., 2018).

1.8.2 Técnicas de caracterización

Como se detalló en el punto anterior, dentro de las técnicas de caracterización existen las *in situ* y las *ex situ*, las cuales utilizan diferentes métodos para conocer los parámetros asociados al rendimiento de las pilas de combustible, dentro de las cuales se pueden mencionar:

1.8.2.1 Técnicas *in situ*

Las técnicas de caracterización *in situ* utilizan el voltaje, la corriente y el tiempo para realizar una evaluación cuantitativa general de la pila de combustible y, por ende, obtener su rendimiento ante distintas operaciones.

Cabe destacar distintas técnicas que se han utilizado para evaluar las pilas de combustible, las cuales son explicadas a continuación:

1.8.2.1.1 Interrupción de corriente

Una de las mayores fuentes de resistencia en una celda de combustible son los electrolitos que están conformados por dos tipos de resistencia, la primera llamada **resistencia a la polarización** y la segunda, **resistencia de la membrana**. La resistencia a la polarización es importante para el rendimiento de la celda de combustible porque cuantifica las pérdidas internas de la celda y se controla durante el desarrollo y la fabricación de la pila, ya que genera calor que debe eliminarse de la celda de combustible. La resistividad electrolítica o **resistencia de la membrana** es una función de las condiciones de operación; por lo tanto, es importante que la resistencia se determine mientras la celda está funcionando (Spiegel, 2017).

Una técnica que busca obtener la resistencia óhmica de la membrana es la de interrupción de corriente (Husar, Strahl, & Riera, 2012), en la que se utiliza un circuito equivalente de la celda, como se muestra en la figura 1.8. En este modelo, la impedancia de una reacción farádica consiste en una resistencia de transferencia de carga activa R_2 (Merwe, Uren, & Bessarabov, 2013a), una inductancia de las placas bipolares L , un elemento electroquímico específico de difusión W , que también se llama elemento Warburg —que no es más que la capacidad producida por fenómenos de absorción y difusión, que en la práctica son despreciables (López Salas, 2015; López, 2015)— y una resistencia de polarización en electrodos (R_w). Por otro lado, se observa una resistencia de electrolito o membrana R_1 y una capacitancia de doble capa C_1 , esta última relacionada con los potenciales eléctricos que surgen en la interfaz electrodo-electrolito, la cual almacena cargas eléctricas y energía, comportándose como un condensador (Simbaña, 2016).

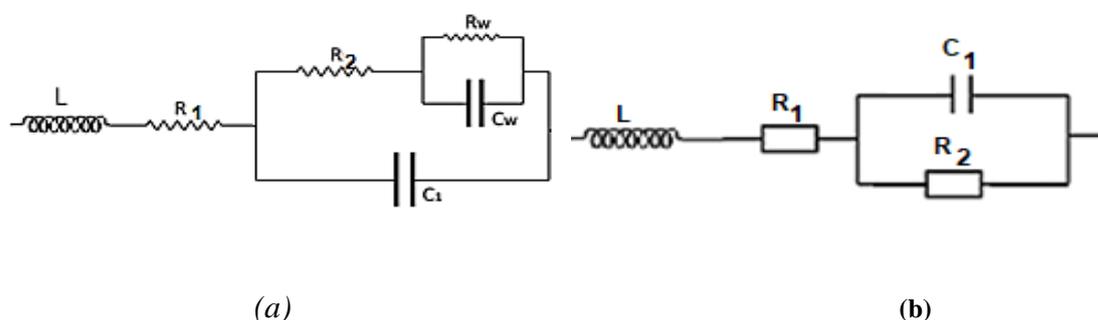


Figura 1.8. Circuitos equivalentes de celda de combustible: (a) Circuito eléctrico equivalente de una celda de combustible ánodo y cátodo, (b) Circuito simplificado. Tomado de: “Experimental characterization methodology for the identification of voltage losses of PEMFC: Applied to an open cathode” por A. Husar, S. Strahl y J. Riera, *Revista internacional de Energía de Hidrogeno*, 2012. 37 (8), pp. 7309-7315, Copyright 2011 por Hydrogen Energy Publications.

En la técnica de interrupción de corriente, mostrada en la figura 1.9, como su nombre lo indica, se interrumpe rápidamente una corriente externa aplicada a la celda y se calcula la diferencia de voltaje antes y después de la interrupción. Posteriormente, se divide este valor entre la corriente

aplicada, para obtener el valor de la resistencia de la membrana o del electrolito, utilizando la ecuación 1.9:

$$V_s - V_0 = I_0 R_1 \quad (1.9)$$

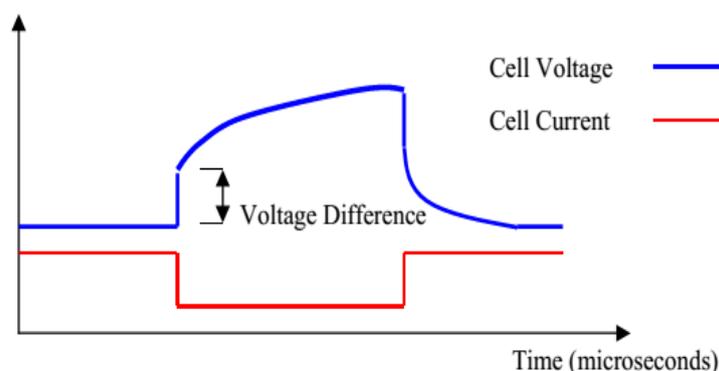


Figura 1.9. Gráfico de una prueba típica de interrupción de corriente. Tomado de: "Advanced Fuel Cell Diagnostic Techniques for Measuring MEA Resistance". *Fuel cell magazine*, 2010, 2, p. 6. Copyright 2005-2009 Scribner Associates Inc.

1.8.2.1.2 Espectroscopia de impedancia

La espectroscopia de impedancia es otro método para determinar la impedancia de la celda y se realiza utilizando un espectrómetro de impedancia. Nuevamente, el punto de partida es el circuito equivalente de la pila de combustible, mostrado en la figura 2.7 (b), suponiendo que las pérdidas asociadas por la Z de walburg son insignificantes en la práctica y que R_w y R_2 se miden en forma conjunta (López Salas, 2015).

En la prueba de espectroscopia de impedancia, la pila de combustible se activa utilizando una pequeña corriente alterna que se superpone a la corriente continua. Para frecuencias bajas, la resistencia total es igual a la suma de R_1 y R_2 , ya que el capacitor actúa como si estuviera abierto. A frecuencias muy altas, la impedancia de la capacitancia es casi cero y, por lo tanto, actúa como un cortocircuito. Por consiguiente, R_1 se mide directamente a altas frecuencias (**Limitations of current interrupt (CI) method compared with electrochemical impedance spectroscopy (EIS).**2019). La resistencia y la impedancia, respectivamente, se pueden ilustrar en la respuesta de frecuencia de la figura 1.10:

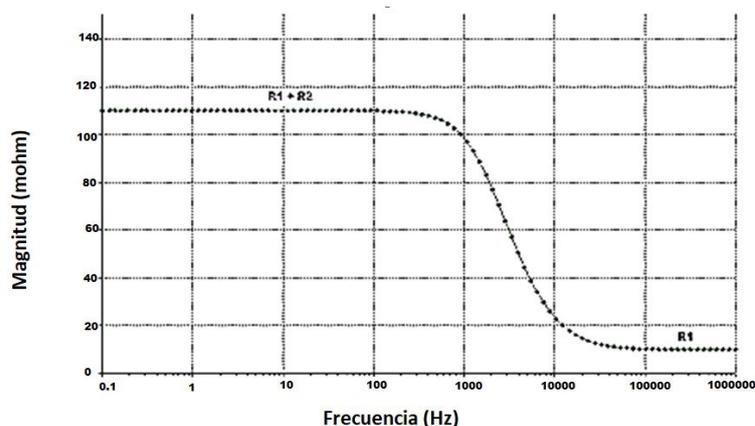


Figura 1.10. Respuesta de la impedancia a bajas y altas frecuencias. Tomado de: “Limitations of current interrupt (CI) method compared with electrochemical impedance spectroscopy”, 2016.

Esta prueba es útil para caracterizar los fenómenos de transporte rápido y lento porque prueba tanto un solo rango como un amplio rango de frecuencias. Además, ayuda a conocer las resistencias asociadas a la transferencia de electrones y masa durante las reacciones electroquímicas y la resistencia de la membrana (Spiegel, 2017) .

1.8.2.1.3 Voltametría cíclica

La voltametría cíclica (CV) es una técnica electroquímica que se emplea comúnmente para investigar los procesos de reducción y oxidación de especies moleculares, también utilizada para estudiar los mecanismos de reacción que implican la transferencia de electrones (Elgrishi et al., 2019). Esta técnica es importante para proporcionar gran cantidad de información sobre los procesos de transferencia de carga y transporte de masa en las superficies de los **electrodos** de trabajo.

Para realizar una representación de los resultados de esta técnica, se realizan gráficos corriente-potencial llamados voltamperogramas, que proporcionan identificación rápida de potenciales redox distintivos de las especies electro activas bajo investigación, de cinética de reacciones heterogéneas de transferencia de electrones y de análisis de reacciones electroquímicas acopladas o procesos de adsorción (Brownson & Banks, 2014).

En la voltametría cíclica, como indican (Ortíz, Martínez, & Hernández, 2006), la variación de potencial en un electrodo estacionario colocado en una disolución no agitada está provocada por una señal de forma triangular. El potencial varía linealmente desde E_0 hasta E_f . Cuando se ha alcanzado este valor, el sentido de barrido se invierte y el potencial vuelve a su valor original E_0 . Este

ciclo de excitación puede ser repetido cuantas veces lo requiera la experiencia. Dependiendo del tipo de estudio, la dirección del barrido inicial puede ser negativa o positiva (figura 1.11).

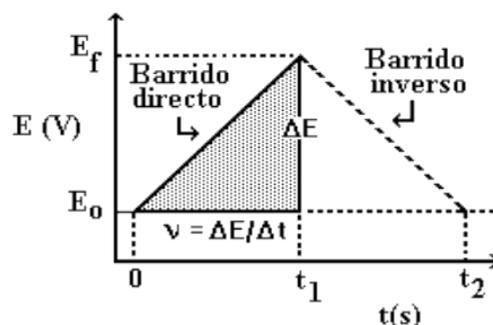


Figura 1.11. Señal de excitación en voltametría cíclica. Tomado de: "Técnicas electro analíticas parte II voltamperometría" de R. Ortiz, Y. Martínez y R. Hernández, 2010, p.33.

Para un sistema reversible, la respuesta corriente-potencial que se obtiene es similar a la presentada en la figura 1.12 (Ruíz, 2015)(Ruíz, 2015). Considerando que el barrido se inicia en el sentido anódico, se observa que al alcanzar el valor adecuado de potencial para que comience la reacción de oxidación, la corriente aumenta notablemente hasta alcanzar un valor máximo. Dado que la especie que reacciona es consumida totalmente en la superficie del electrodo, la corriente de oxidación cae a medida que se aumenta el potencial. Una vez alcanzado el valor de potencial de corte anódico, el barrido de potencial es invertido y se obtiene un aumento de corriente catódica correspondiente a la reacción de reducción. Dos valores importantes para el análisis del proceso de óxido reducción son las corrientes obtenidas en los máximos, llamados corriente de pico anódico (ipa) y corriente de pico catódico (ipc), respectivamente ("Voltametría cíclica", 2003).

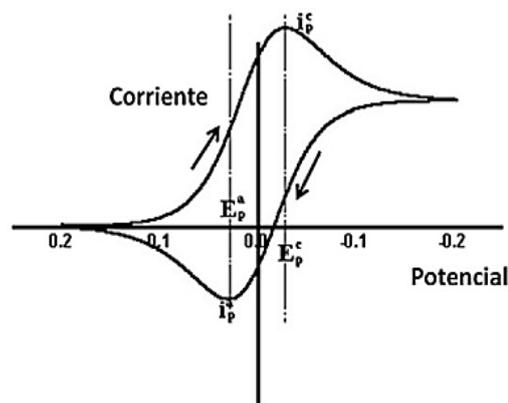


Figura 1.12. Voltagrama obtenido por una voltametría cíclica. Se parte de un potencial de 200mV y se va hasta los -200mV. Las flechas indican la dirección de barrido. (2014). Tomado de: "Estudio de la corrosión electroquímica en los bronce de aluminio con níquel (NAB)", de A. R. Ruiz, 2014, p. 17.

En la figura 1.13 se muestran dos convenciones que se usan comúnmente para informar datos de voltametría cíclica, la convención US (United State) y IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry):

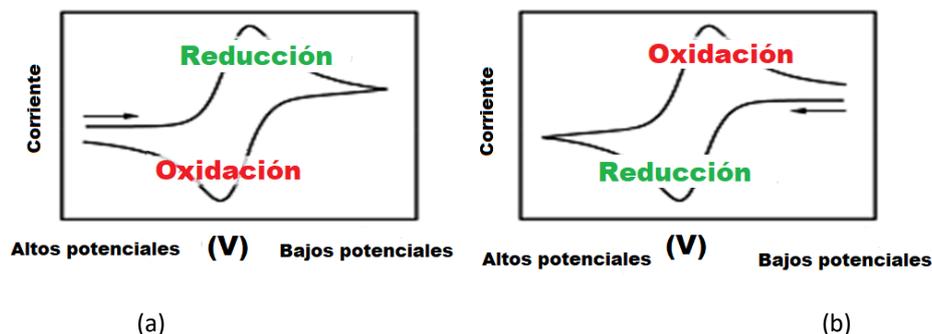


Figura 1.13. Convención utilizada para representar gráficos de voltagramas: (a) Convención del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), (b) convención de la Unión Internacional para la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Tomado de: "Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry" de N. Elgrishi, K. Rountree, B. McCarthy, E. Rountree, T. Eisenhart y J.A. Dempsey, *Journal of Chemical Education*, 2018, 95(2), p. 198, Copyright 2017 American Chemical Society and Division of Chemical Education, Inc.

1.8.2.2 Técnicas *ex situ*

Las técnicas *ex situ* aplican diferentes métodos para obtener información relevante de las características de los componentes individuales que intervienen en la operación de las pilas de combustible, como son las membranas de intercambio protónico, los electrodos (ánodo y cátodo), los platos bipolares y los catalizadores.

1.8.2.2.1. Determinación de la porosidad

La característica de porosidad está ligada directamente a los electrodos, ya que estos deben ser suficientemente porosos para permitir el transporte de gas y facilitar las reacciones electroquímicas (Yu, Carter, & Zhang, 2012).

Existen varias técnicas bien conocidas para determinar el estructuras porosas de nano y microescala, microscopía de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) (Suzuki, Tanaka, Hayase, Tsushima, & Hirai, 2016), que utilizan un haz de electrones para incidir en la estructura, y dado que estos tienen una longitud de onda mucho menor que la luz, pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas y, por lo tanto, facilitan la visualización de los poros en la materia.

Otras técnicas para estudiar la porosidad de electrodos son la intrusión de mercurio y mediciones de fisisorción.

La adsorción física o fisisorción de gases es una técnica de análisis de propiedades texturales (superficie específica, volumen y tamaño de poros) basada en la interacción que tiene lugar entre un gas (adsorbato) y el sólido que se quiere caracterizar (adsorbente). Una técnica comúnmente utilizada es la técnica de porosimetría manométrica, en la que se analiza principalmente el volumen de gas retenido por la superficie del sólido (en el caso de las pilas de combustible, de los electrodos), en función de las condiciones de presión aplicadas ("Adsorción física de gases", 2013).

La técnica de intrusión de mercurio se basa en el llenado de los poros de los electrodos con mercurio, aplicando una presión establecida para obtener curvas de intrusión y extrusión características del material. En esta prueba, la presión de mercurio aplicada es inversamente proporcional al diámetro (D) de los poros intruídos. Se puede obtener información de los diámetros medios de los poros y la porosidad, que se define como el volumen total de los poros (V_{poros}), y el volumen total de la muestra (VC) (Campos, Barrios, González, & A, 2013).

$$E\% = \left(\frac{V_{Poros}}{V_c} \right) * 100 \quad (1.10)$$

1.8.2.2.2 Permeabilidad

Los electrodos y las capas de catalizador deben ser **altamente permeables**, mientras que los electrolitos deben ser herméticos a los gases.

La membrana también actúa como separador de los gases reactantes (ej. H_2 y O_2), por lo que es imprescindible una muy **baja permeabilidad** a dichos gases. La permeabilidad a los gases se traduciría en una caída de potencial (Asensio et al., 2011).

Cuando existe permeabilidad en las membranas de intercambio protónico, ocurren pérdidas de combustible, ya que el hidrógeno atraviesa el cátodo, produciendo dióxido de carbono y agua sin generar electricidad. Por otro lado, puede ocurrir envenenamiento del catalizador del cátodo, ya que el hidrógeno suele contener CO_2 y CO aunque esté purificado. A su vez, ocurre una disminución de oxígeno disponible para reaccionar con el combustible (Echeverri, 2013) .

El conocimiento de las propiedades de la superficie y la estructura de los poros es importante para mejorar la gestión del agua, en la que intervienen dos procesos, el de eliminación de exceso de agua en el catalizador y el que mantiene la hidratación de la membrana para mejorar la conductividad protónica, además del transporte de gases. De allí que se utilicen distintas técnicas *ex situ* para medir las características de transporte del GDL y su permeabilidad (Phillips, Friess, Hicks, Bellerive, & Hoorfar, 2012).

Experimentalmente, con base en la ley de Darcy, se puede obtener la permeabilidad midiendo la caída de presión a un caudal específico a través de muestras de GDL, de acuerdo con la ecuación (1):

$$Q = \frac{-kA \Delta P}{\mu L} \quad (1.11)$$

Donde Q es el caudal volumétrico del fluido en m^3s^{-1} , k es la permeabilidad del medio poroso en m^2 , A es el área de la sección transversal del medio poroso en m^2 , μ es la viscosidad del fluido en Pa.s, ΔP es la diferencia de presión a través del medio poroso en Pa L es la distancia a través del medio en m (El-kharouf , A Mason, T, Brett, & Pollet, 2012).

1.8.2.2.3. Capacidad de absorción de agua

La absorción de agua en las membranas de intercambio iónico es muy importante, dado que la reacción de intercambio protónico requiere una gran cantidad de agua para coordinarse con el protón, según se va moviendo a través de la membrana (Fernández, 2008).

Para conocer esta característica de absorción de agua en las membranas, se registra la masa de una muestra de membranas (secas) y luego se humectan hasta el equilibrio de hinchamiento en agua destilada desionizada tipo I durante 24 horas, a temperatura ambiente. Luego, las muestras se sacan del agua y se retira el exceso de agua con papel absorbente. Se registra la masa húmeda de las membranas tres veces (las membranas son materiales porosos). Las membranas se secan a 50°C por 2 horas y se elimina todo rastro de humedad con un desecador conectado al vacío durante 5 horas hasta obtener masa constante. El porcentaje de absorción de agua ($\%A_A$) se calcula por la ecuación 22:

$$\%A_A = \left(\frac{P_{hum} - P_{sec,f}}{P_{sec,0}} \right) * 100 \quad (1.12)$$

Donde P_{hum} , $P_{sec,f}$ y $P_{sec,0}$ son las masas de las muestras húmedas y secas después del proceso de humectación, y secas en el tiempo cero de la prueba, respectivamente. $\%A_A$ son los gramos de agua por gramos de muestra (g/g) (Tapiero, 2015).

1.8.2.2.4. Conductividad protónica

La conductividad protónica es la principal característica de las membranas, ya que está relacionada con la capacidad de transportar protones a través de la misma.

Esta característica depende de las condiciones de operación, en específico de la temperatura

y la humedad relativa. Para su aplicación práctica, la conductividad protónica de una membrana ha de estar, al menos, en torno a los $10^{-2} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Asensio et al., 2011).

Como indica Gonzáles (2009), existen dos métodos para medir la conductividad protónica: el método potenciométrico y por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica. En el primero se obtiene la resistencia de la membrana realizando medidas sucesivas de diferencia de potencial entre electrodos de referencia (con y sin membrana), para obtener dos valores de resistencia, uno de una solución acuosa de KOH entre los dos electrodos de referencia: $R=R_{\text{KOH}}$ y el segundo con la membrana. La resistencia total es la suma de la resistencia del electrolito (KOH) y de la membrana: $R=R_{\text{KOH}} + R_{\text{Membrana}}$. Utilizan la siguiente ecuación (1.13) para el cálculo de la conductividad:

$$\sigma = I/(R_{\text{Membrana}}S) \quad (1.13)$$

Donde l es el espesor de la membrana (cm), S es la superficie de la membrana expuesta al campo electromagnético (cm^2) y R_{Membrana} la resistencia de la membrana.

Por otro lado, este valor de conductividad protónica se puede realizar utilizando la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) (explicada anteriormente), en el que se coloca la membrana entre dos electrodos de prueba y se aplica un potencial alternante, midiendo a diferentes frecuencias y utilizando el diagrama de Nyquist y el circuito equivalente mostrado en la figura 1.14, en el que, a altas frecuencias, el capacitor que corresponde al efecto de doble capa mencionado anteriormente, se comporta como un corto circuito y se obtiene la resistencia de la membrana que corresponde a la intersección con el eje X.

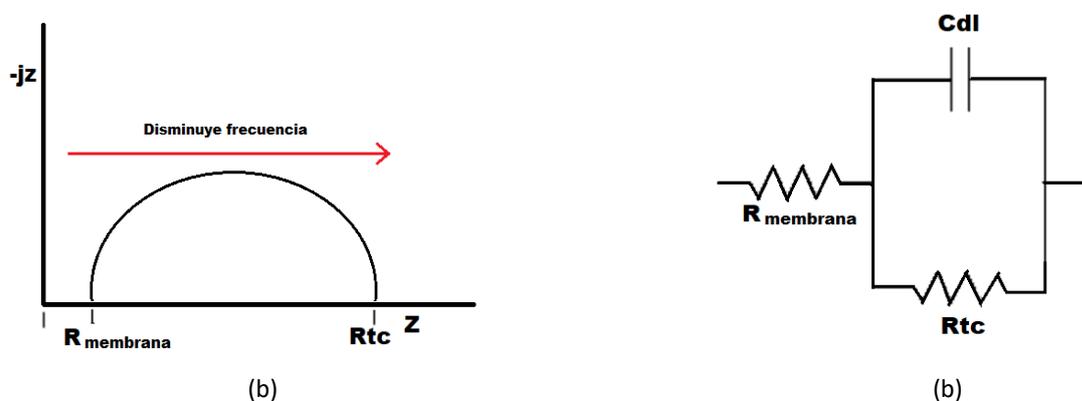


Figura 1.14. Representación de impedancias reales e imaginarias (R_{tc} : resistencia a la transferencia de carga, R_{membrana} : resistencia del electrolito o membrana, C_{dl} : capacitancia de la doble capa): (a) Diagrama de Nyquist, (b) circuito equivalente. Adaptado de: "Aplicación de la técnica espectroscopia de impedancia electroquímica (eis) en el estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto", por Pérez, T., 2002, pp. 1-29.

1.8.2.2.5. Capacidad de intercambio iónico

La capacidad de intercambio iónico (IEC) de una membrana es una medida de la facilidad con la que la membrana absorbe iones del electrolito y los cede a otro electrolito (Martínez, 2016).

Realpe, Maza, Acevedo & Herrera (2015) calculan esta característica, utilizando tres muestras de 2 cm × 2 cm de membranas preparadas al 1M, las cuales son sumergidas por 24 horas, en una solución preparada al 1M con ácido clorhídrico, luego agregadas a una solución 1M de NaCl, durante el mismo tiempo. Después de este proceso, se extraen las membranas y se titulan las soluciones con 0.01M de NaOH. La capacidad de intercambio iónico la calculan mediante la siguiente ecuación:

$$IEC \left(\frac{mequiv}{g} \right) = \frac{V_{NaOH} \times M}{W} \quad (1.14)$$

Donde:

V = Volumen

Na OH = Agregado para neutralizar la solución

M = Concentración de NaOH

W = Peso de la muestra seca

1.9 Técnicas y diagnósticos de fallos en pilas de combustible de intercambio protónico

La primera interrogante que surge al momento de querer incorporar las pilas de combustible a la red de generación de energía es: ¿Cómo operar el sistema de la manera más óptima posible para alargar su vida útil? En este punto es imprescindible definir el concepto de **diagnóstico de fallos** en pilas de combustible.

Sobre este tema, Benmouna et al. (2017) indican que el diagnóstico incluye tres puntos principales: la detección, la localización y la identificación. Sin embargo, antes de poder dar un diagnóstico, la celda, stack o pila debe estar bien caracterizada, utilizando las diferentes técnicas verificadas en puntos anteriores, entre otras.

Con esto se consigue llevar a cabo una monitorización y control en tiempo real y desarrollar estrategias para mitigar los efectos de los distintos factores que afecten su operación (Schiller, Gülzow, Schulze, Wagner, & Friedrich, 2010), que —como indican Calderón, González, Calderón, Segura & Andújar (2016)— son de diversa índole, debido a que la tecnología de pilas de combustible implica tanto sistemas eléctricos como reacciones químicas. Entre estos factores se pueden

mencionar la degradación de componentes, los aspectos de distribución no homogénea de los combustibles a través de sus elementos, las impurezas, la composición del aire, los materiales, el catalizador, la gestión del agua, la temperatura, la humedad de sus membranas y la inversión del voltaje de las celdas.

El diagnóstico de fallos incluye distintas etapas, como indican Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin & Kavuri (2003). En primera instancia, se requiere de la **detección**, con la cual se identifican cambios abruptos en la operación normal de estos sistemas. Además, se necesita **aislar el fallo**, que no es más que localizar el sitio o área de ocurrencia del mal funcionamiento; y, por último, la **identificación** entre distintos tipos de problemas, magnitud y causas, ya sean nuevos o anteriormente estudiados en estos sistemas.

Los dos enfoques encontrados en la literatura, en lo que respecta a las técnicas de diagnóstico, son los diagnósticos orientados al estudio de las celdas por medio de modelos y el dirigido al estudio por medio de la realización de análisis experimentales.

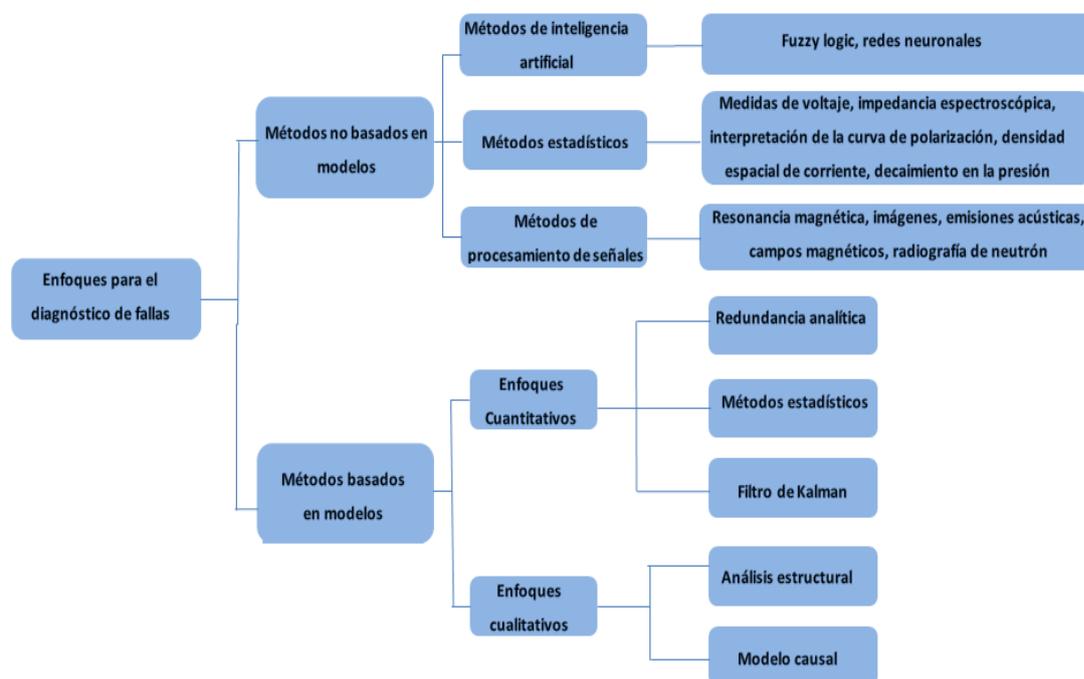


Figura 1.15. Enfoques en el diagnóstico de fallos. Adaptado de “Fault diagnosis methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System” de A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, F. Gustin, H. S. Ramadan, S. Fukuhara, *ScienceDirect*, 2017, 42(2) pp. 1538, Copyright 2016 Hydrogen Energy Publications LLC.

En la figura 1.15 se ilustran los principales enfoques **no basados en modelos** que se han dividido, según Benmouna et al. (2017), en enfoques de procesamiento de señal, que incluyen la resonancia magnética (MRI), técnica que utiliza ondas de radiofrecuencia que impactan sobre átomos sensibles (entre estos el H₂), los cuales absorben energía y luego la liberan en una señal de resonancia (González, Aldana, & Rosa, 2012). Se ha demostrado que esta técnica es una sólida

herramienta de diagnóstico *in situ* para recopilar información sobre la generación y el transporte de agua dentro de una celda de combustible PEM (Dunbar & Masel, 2008; Zhang et al., 2008).

La **emisión acústica**, como indican Romero et al. (2018), es una forma de detección pasiva, en la que las ondas de alta frecuencia excitan a un sensor que contiene un cristal piezoeléctrico, el cual produce un voltaje, detectando de esta forma señales u ondas de tensión causadas por el proceso de degradación del material. Mortazavi, Santamaria, Benner & Chauhan (2019) demuestran que el uso de ondas de presión acústica superpuestas en el flujo de aire del canal reactivo es efectivo para mejorar la eliminación de agua líquida de las superficies de la capa de difusión de gas (GDL).

La técnica de **medidas de campo magnético** es utilizada por Cadet, Jemeï, Druart & Hissel (2014) para verificar la distribución de corrientes a lo largo de un stack de pilas de combustible, modos de operación, degradaciones y mal funcionamiento de componentes auxiliares, entre otros.

La herramienta de **Radiografía de neutrones** es utilizada para investigar distribuciones de agua en pilas de intercambio protónico (Alrwashdeh et al., 2017). Se basa en la obtención de imágenes a partir de la detección de los neutrones que atraviesan una muestra. De esta manera, permite observar la distribución de elementos livianos tales como H o Li; de allí que se utilice también para la determinación del hidrógeno en los análisis electroquímicos de las pilas de combustible (“STOR: Advanced System for Tomography and Radiography”, 2019).

Los **enfoques basados en inteligencia artificial IA** incluyen **lógica difusa**, que se basa en asignar valores numéricos discretos a rangos lingüísticos, utilizando datos de medición obtenidos de un sistema de monitorización e infiriendo comportamientos con base en la información adquirida del conocimiento previo. Es así que se ha utilizado para diagnosticar y evaluar fallos en pilas de combustible utilizando modelos comparativos (Davies, Jackson, & Dunnett, 2017).

Las redes neuronales son empleadas para procesar información de entradas externas o datos, a través de diferentes capas, configuradas con la finalidad de obtener solución a un problema. En este sentido, han sido utilizadas por García A & Elizalde (2017) para evaluar el efecto que tiene la geometría de los canales de flujo de las placas bipolares en el desempeño de celdas de combustible de óxido sólido.

Los métodos experimentales incluyen medición de voltaje, espectroscopia de impedancia, con lo que se puede identificar el espectro de impedancia de las pérdidas de una celda de combustible (ohmicas, activación y pérdidas de transferencia de masa) por medio de un diagrama de Nyquist (Merwe, Uren, & Bessarabov, 2013). Entre otras técnicas experimentales, se puede mencionar la curva de polarización, que permite evaluar de un modo cuantitativo y global el rendimiento e intensidad de potencia de las pilas de combustible (Medina, 2015).

Cabe mencionar también las técnicas de distribución espacial de la densidad de corriente,

utilizadas para investigar eficiencias de operación anódicas y catódicas en celdas de combustible, aplicando diferentes parámetros de entrada como son la presión y la humedad relativa (Bowen & Dengcheng, 2019; Seung-Gon, Min-Jin, & Young-Jun, 2015)

A su vez, la caída de presión es utilizada como método de diagnóstico para verificar ubicación y existencia de fugas en pilas de combustible o rotura en membranas, cuando se analiza la variación de voltaje en función de presiones de gases neutrales, aplicados al ánodo y cátodo de celdas de combustible (Ashraf Khorasani, Asghari, Mokmeli, Shahsamandi, & Faghih Imani, 2010). La cromatografía de gases se utiliza en la determinación de la concentración de impurezas en el combustible y oxidante de pilas de combustible (Bender et al., 2009).

La diagnosis de fallos en sistemas dinámicos **mediante modelos** se basa en comprobar la consistencia de los comportamientos observados (mediante las medidas de los sensores) con los estimados mediante modelos. Dicha consistencia se basa en el cálculo de la diferencia entre el valor predicho a partir del modelo y el valor real medido por los sensores. Esta diferencia, conocida como residuo, se compara con un valor umbral (cero en el caso ideal). Cuando el residuo es mayor que el umbral, se determina que hay un fallo en el sistema; de lo contrario, se considera que el sistema está funcionando correctamente (Castello, Puig, & Blesa, 2016).

El enfoque **basado en modelos** incluye el cualitativo, que integra el análisis estructural, el cual se utiliza con el fin de identificar la redundancia existente para la generación de residuos que sean capaces de detectar y aislar los fallos definidos. Utilizando esta técnica, Ohenoja, Sorsa & Leiviskä (2018) proponen un modelo estructural para predecir el comportamiento de la curva de polarización, el cual también se ha utilizado para detección y aislamiento de fallos en el suministro de aire de una celda de combustible (Yang, Aitouche, & Ould, 2009).

Dentro de este enfoque cualitativo se encuentran los modelos causales que incluyen el árbol causal, el cual ofrece herramientas poderosas para un análisis deductivo, que consiste en buscar las diversas combinaciones de eventos que conducen a la degradación de la pila de combustible (Brik, Ammar, Djerdir & Miraoui, 2016), así como los gráficos directos firmados (Maurya, Rengaswamy, & Venkatasubramaniana, 2006).

Sin embargo, los enfoques basados en modelos cuantitativos incluyen las Relaciones de Redundancia Analítica (ARR) (Pouliezos & Stavrakakis, 1994) que se han utilizado en pilas de combustible con el objetivo de detectar fallos como inundaciones, secado dentro de las celdas de combustible y sobretensiones del compresor de aire (Yang, Aitouche, & Bouamama, 2010).

Los filtros de Kalman son un conjunto de ecuaciones matemáticas que implementan un estimador del tipo predictor-corrector, utilizando conocimientos del sistema estudiado y cualquier información disponible, ruidos y errores de medida acerca de las variables de interés. Existen

estudios (Buonocunto, Spagnuolo, & Zamboni, 2017) que utilizan este método para detectar condiciones que afectan a la celda y que causan el secado e inundaciones.

1.9.1 Revisión de métodos de diagnóstico basados en modelos

Dentro de los métodos de diagnósticos basados en modelos se han revisado distintas investigaciones, entre las cuales destacan:

El modelo realizado por Aguirre (2015), un modelo analítico desarrollado y validado bajo diferentes condiciones de operación, predice las principales variables que intervienen en el funcionamiento de la pila de combustible tipo PEM, como son la distribución de temperatura, el perfil de concentraciones de cada componente (H_2 , O_2 , H_2O), la distribución de presión y velocidad, la curva característica (I-V) y las diferentes pérdidas que tiene la pila de combustible (activación óhmicas y concentración). Este modelo se puede adaptar tanto para celdas unitarias como a todo un stack.

Rios (2016) ha planteado un modelo matemático sobre el comportamiento estacionario de una pila de combustible de membrana polimérica de intercambio de protones, a través de la formulación de una ecuación que determina la curva de polarización, el cual permite caracterizar el funcionamiento de la pila y se puede utilizar a efectos de diseño, diagnóstico y control.

Saleh, Calay & Rashid (2013) realizan un modelo matemático utilizando ecuaciones electroquímicas para modelar el comportamiento de la tensión de circuito abierto de una pila de combustible PEM, bajo diferentes condiciones de funcionamiento de temperatura y presión. Cabe destacar que este modelo se ha derivado para dos condiciones de operación: cuando el agua de salida de la pila de combustible está en estado líquido y cuando se encuentra en estado de vapor.

Da Costa Lopes (2013) realiza un estudio de modelado de apilamientos de celdas de combustible PEM, considerándolos como sistemas variantes en el tiempo, en especial el comportamiento del voltaje. En este estudio se lleva a cabo un análisis experimental para validar la hipótesis de que tales dispositivos presentan un comportamiento variante en el tiempo y se propone una técnica de identificación de sistemas basada en redes neuronales recurrentes para modelar tal comportamiento, teniendo en cuenta aplicaciones de control en tiempo real y control predictivo. Se muestra la aplicación de esta técnica en el desarrollo de modelos de predicción de dos apilamientos PEM comerciales que operan bajo diferentes regímenes de carga. Los modelos desarrollados, según la metodología propuesta, fueron capaces de predecir la respuesta dinámica de tensión de los apilamientos estudiados con error inferior a 1% en la mayoría de los casos.

Quispe & Espinola (2014) desarrollan expresiones matemáticas para proponer un modelo que simula el comportamiento eléctrico de una pila de combustible a través de una curva de

polarización. A pesar de que el comportamiento global del modelo y el ensayo experimental son realistas, una comparación más detallada de los resultados indica la necesidad de una mejor descripción de los términos del modelo, así como del uso de un dispositivo de ensayo experimental más confiable.

Strahl (2014) investiga la relación entre el rendimiento, eficiencia y tiempo de vida con respecto a la temperatura de operación y humidificación de la celda de combustible PEM de cátodo abierto sin humidificación; para lo cual desarrolla un modelo matemático dinámico que permite el estudio de la relación entre la estructura de los electrodos con el comportamiento transitorio del voltaje a cambios de temperatura y humidificación de la pila de combustible. Asimismo, utiliza diversas técnicas experimentales como la espectroscopia electroquímica de impedancia (EIS), la voltametría cíclica (CV), la cromatografía de gases (CG), la espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS), la difracción de rayos X (XRD) y la microscopia electrónica de barridos (SEM).

Salas (2015) realiza una aproximación al modelo de impedancia utilizando un análisis geométrico para el ajuste y realizando ensayos paramétricos con diferentes celdas combustible para las pruebas. Entre los ensayos realizados están los cambios de caudal en los gases de alimentación, la temperatura, la presión, la evolución temporal y la compresión mecánica, utilizando diferentes celdas combustible para las pruebas, las cuales son posteriormente usadas para el análisis del modelo.

Rubio, Gomez, Cortes, Huesca & Bravo (2015) proponen un modelo dinámico basado en ecuaciones electroquímicas para representar el voltaje de salida de una celda de combustible de una pila PEM, utilizando diferentes resistencias de carga y densidad de corrientes. Con este modelo desarrollaron un control experimental para aumentar el voltaje generado y minimizar el uso de combustibles.

Muchas de las investigaciones realizadas, tanto de las celdas de combustible como del stack, utilizaron herramientas computacionales para modelar el comportamiento de las celdas de combustible.

Lembcke (2014) se centró en la **modelización del funcionamiento** de una pila de combustible de metanol, "Direct Methanol Fuel Cell", mediante un modelo 1+1D programado en Matlab que simplifica los cálculos elaborados en modelización 3D simulado en Fluent. Sin embargo, la desventaja de una modelización 1D es que no se toman en cuenta ciertos factores que intervienen en el funcionamiento del sistema, como los temas de transporte, debido a distribuciones en la concentración del combustible.

Jaralla (2015) desarrolló un **modelo bidimensional** utilizando una dinámica de flujos computacional (CFD) para resolver las ecuaciones que gobiernan las especies de transporte, el

impulso, la conservación de la carga y la energía. En este modelo se utiliza un grosor finito para modelar las capas de catalizador y obtener una descripción más realista de la cinética de la reacción electroquímica que ocurre en la pila de combustible. Con este modelo bidimensional no se toman en cuenta varios componentes de la pila de combustible con más complejidades físicas como sería con un modelo tridimensional.

Strah, Husar, & Riera (2010) propusieron un **modelo dinámico CFD** de dos dimensiones de una sola celda dentro de la pila para investigar la distribución y el transporte del agua dentro de la celda antes, durante y después de realizar una purga en diferentes condiciones de funcionamiento, ligados al rendimiento de la celda. Su modelo es capaz de estudiar la dinámica de transferencia de agua a través de la membrana y a lo largo del canal, incluyendo la saturación de agua en estado líquido. Este modelo se ha utilizado para controlar adecuadamente la purga de hidrógeno.

Purushothaman & Saha (2011) realizaron un **diseño computacional 3D y análisis paramétrico de una celda unitaria PEM** para estudiar la influencia de la concentración de oxígeno en el rendimiento de la pila de combustible. Para ello, simularon el comportamiento del cátodo PEMFC con datos experimentales y computacionales. Encontraron que existe poco impacto en la curva de polarización pronosticada y hubo una caída muy pequeña de aproximadamente 0.01 V en el rendimiento previsto dependiendo de la concentración de oxígeno.

Santis (2014) presentó un estudio que utiliza una herramienta de **dinámica de fluidos computacionales (CFD)** para estudiar una celda de combustible de membrana de intercambio protónico con topología de canales interdigitados en las que el flujo de reactivo se da por difusión y convección (Tajiri, Karani, & Shrivastava, 2018). En este estudio se utilizó el programa FLUENT para resolver las ecuaciones complejas que determinan el voltaje de operación, la difusión de reactivos en los electrodos, los fenómenos de transporte, el manejo del agua y la distribución de temperatura en diversas secciones del volumen de la celda.

De la Torre, González & García (2014) a través de una técnica de **modelación de dinámica de fluidos computacional (software ANSYS FLUENT)**, realizaron una modelación tridimensional y estacionaria de una celda de combustible de intercambio protónico. Compararon el modelo con datos experimentales y con resultados de otros modelos, obteniendo buenas aproximaciones. Los parámetros de operación que fueron estudiados en el dispositivo incluyen, temperatura, presión, sentido de flujos, porosidad de los electrodos, humidificación de los gases de alimentación y concentración de oxígeno. Se encontró que el rendimiento del dispositivo tiene gran sensibilidad a la variación de los parámetros termodinámicos y la composición de los gases. Una de las limitaciones del modelo implica una inexactitud de la solución obtenida a altas densidades de corriente, por la presencia de agua líquida en exceso en el cátodo.

Li, Li, Liu, & Guo (2017) propusieron, sobre la base del principio y el modelo clásico de pilas PEMFC, un modelo de celda única, introduciendo coeficientes de posición para verificar la distribución de voltajes en el stack. El modelo se valida respectivamente con datos a 60 A y 100 A. Los resultados muestran que el modelo refleja las características básicas de la falta de uniformidad del voltaje y proporciona una herramienta para llevar a cabo diagnósticos de operación a nivel de celda individual.

(Yang, Jiao, Yan Yin, & DuA, 2020) través de dos modelos de pila y utilizando supuestos de flujo de reactivos uniformes y no uniformes, estos autores investigan la distribución de voltaje en celdas, caudal másico, temperatura, caudal reactivo y otros, obteniendo que en el caso de la distribución de voltaje en celdas, existen variaciones entre celdas. En el caso de la temperatura si se asume un flujo uniforme se obtienen menores variaciones entre diferentes celdas y un aumento en la temperatura de la pila. Por otro lado, encuentran que la presión de entrada de combustible contribuye a una distribución uniforme de reactivos mejorando así el rendimiento del sistema.

1.9.2 Revisión de métodos de diagnóstico no basados en modelos

En la segunda rama del tema de la diagnosis se incluyen los métodos estadísticos en el que se analizan variaciones de potencia, temperatura, presión, sentido de flujos, porosidad de los electrodos, humidificación de los gases de alimentación, concentración de oxígeno y análisis de la curva de polarización. Esta última relaciona la densidad de corriente con el voltaje de la pila y, en múltiples investigaciones, se ha utilizado para detección de la degradación en estos dispositivos (Bezmalinovic, Simic, & Barbir, 2015). Asimismo, se utilizan medidas de presiones de combustibles tanto en el ánodo como en el cátodo, entre otras.

Dentro de las investigaciones no basadas en modelos, Agila & Huilcapi (2014) desarrollaron e implementaron un método no invasivo de bajo coste basado en técnicas de decisión borrosa que permite estimar los estados críticos de operación de una pila de combustible PEM. La estimación se realiza mediante perturbaciones al estado de operación de la pila y el análisis posterior de la evolución temporal del voltaje generado por la pila. La técnica que formularon sirve para detectar estados críticos aplicables a pilas PEM.

(Sachin Chugh et al., 2020) realizan un estudio experimental de una pila de combustible PEM utilizando curvas de polarización, las cuales se comparan con los resultados de un modelo de estado estacionario, desarrollado en MATLAB. El modelo predice un aumento en el rendimiento de PEMFC al aumentar su temperatura de funcionamiento, presión y la humedad del reactivo.

(Halvorsen, Pivac, Bezmalinovi, Barbir, & Zenith, 2020) investigan un método de aplicación de la EIS para el diagnóstico de la degradación de pilas de combustible a través de un algoritmo

realizable dentro de un control típico de una celda de combustible. La ventaja de este método es que no es necesario llevar a cabo una espectroscopía de impedancia completa, lo que permite su utilización en sistemas que se encuentren en modo de operación normal.

(Dib, Maizia, Martemianov, & Thomas, 2019) utilizan una metodología basada en el análisis en cortos periodos de tiempo de las señales de voltaje y presión para cuantificar los efectos de las inundaciones y el secado dentro de los sistemas de celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC). Para la detección de fluctuaciones de estos parámetros en casos de inundación y secado se utiliza la desviación estándar. Con este estudio se obtiene una herramienta confiable en el estudio de estos sistemas.

Por otro lado, dentro de los métodos no basados en modelos, ha llamado el interés de muchos investigadores el uso de medidas de **tensión de corriente continua** como indicador de fallos que puedan ocurrir en estos sistemas. En este aspecto se han desarrollado diversos modelos matemáticos y experimentos *in situ* que buscan utilizar el voltaje de la pila de combustible como medida de diagnóstico, ya que se ha evidenciado que si se registra una caída o decremento en este, se puede inferir un fallo en la operación del sistema (Yousfi-Steiner et al., 2008).

Der Kuan, Septiani & Yuliane (2018) diseñan un sistema de monitorización basado en LabView y en un sistema embebido myRIO, con el cual se puede monitorizar y obtener datos de una pila de combustible de un vehículo. Con esta herramienta logran obtener la corriente y voltaje del stack además de medir estos parámetros en la batería, motor y convertidor CC/CC.

Blanchet & Domit (2019) desarrollaron un sistema para monitorizar el desempeño de un sistema electroquímico de celdas. La monitorización se puede realizar de forma remota para medir el voltaje en la pila y comparar los valores medidos con valores de referencia predeterminados con este sistema. El voltaje permite detectar la disminución del rendimiento y verificación preventiva.

(Benouioua, Candusso, Harel, François, & Picarda, 2020) proponen el desarrollo de una herramienta de caracterización de celdas de combustible basada en voltaje Singularity Spectrum (VSS), un patrón que puede estimarse ventajosamente a partir de la evolución de voltaje de pila ((Benouioua, Candusso, Harel, & Oukhellou, 2014)), con este estudio logran verificar y obtener indicativos del estado de estos sistemas ante diferentes modos de operación (vinculados con una difusión del aire más pobre / mejor, con hidratación MEA más baja / más alta).

Sin embargo, el método de medir voltaje de toda la pila no constituye una medida precisa, ya que no se puede obtener la localización del fallo, por lo cual, siendo que la pila de combustible está constituida por múltiples celdas interconectadas —lo que se denomina “stack”—, **es más preciso realizar medidas de tensión a nivel de cada una de las celdas** que conforman esta configuración, de manera que, al encontrar un valor de tensión inesperado, se pueda tener la

ubicación precisa con solo identificar la celda en cuestión. Este método se ha utilizado para verificar fugas de combustible, ruptura en las membranas y deterioro en los sellos utilizados para su ensamblaje (Ashraf Khorasani, Asghari, Mokmeli, Shahsamandi, & Faghieh Imani, 2010).

Los voltajes de las celdas reaccionan rápida y sensiblemente a los cambios de condición de la pila, lo que permite la detección de fallos antes de que el voltaje de toda la pila se altere significativamente. Además, los voltajes pueden disminuir en cualquier celda como resultado de eventos internos como una gota de agua que obstaculiza el flujo de gas o un agujero en una membrana (Mulder, Coenen, De Ridder, & Martens, 2014).

Adoptando el método de medición de voltajes por celdas unitarias, el grupo de investigación GAIRBER (Grupo de Aprovechamiento Integral de Residuos Biomásicos y Energías Renovables) de la Universidad de Extremadura en España, diseñó, desarrolló y validó un sistema de monitorización en tiempo real para el diagnóstico y detección de fallos de pilas de combustible a nivel de celdas, capaz de ser replicado para pilas de hasta 120 celdas (Calderon, Gonzalez, Calderon, Segura, & Andujar, 2016).

Andujar & Segura (2015) presentan una herramienta de software libre para la simulación y observación en tiempo real de las distintas variables asociadas a una pila de combustible de electrolito polimérico de 80 celdas. Para ello utilizan un modelo matemático semiempírico desarrollado a partir de datos del fabricante, para predecir su comportamiento y que puede ser extrapolado a otros tipos de pilas de combustible.

Vivas, De las Heras, Segura & Andújar (2018) desarrollaron un prototipo “plug and play” a través de una conexión USB al ordenador, que permite la monitorización de voltajes en celdas, y es aplicable a una pila de 80 celdas con corriente máxima de 10^a. Este prototipo, además de medir voltajes en celdas, permite mediciones de la corriente y temperatura del stack, con buena precisión.

Cai, Maiké Ye, Quan & Quan (2019) desarrollaron un sistema de monitorización utilizando un microcontrolador LTC6803 que permite medir hasta 12 señales de voltaje en celdas. Esta configuración de medidas se realiza utilizando la configuración en cascada hasta alcanzar el total de entradas de 135 celdas con las que operaba la pila de combustible experimental.

Migliardini, Di Palma, Gaele & Corbo (2019) realizaron un estudio experimental con una pila de combustible de 96 celdas individuales y con una potencia de 6,2 kW, a la cual le realizaron un análisis de uniformidad del voltaje, tanto en estado estable como en condiciones dinámicas, detectando uniformidades crecientes a mayores potencias del stack. Se observaron, entre celdas, variaciones máximas muy por debajo de 50mV. Para condiciones dinámicas, a mayor rapidez y salto de potencia en el tiempo, se observó una mayor no-uniformidad en los voltajes entre celdas individuales, observando diferencias de hasta 100mV entre algunas de ellas.

Hu et al. (2018) propusieron un modelo para explicar el mecanismo de redistribución de corriente y voltaje entre celdas, utilizando el método de medidas en dos puntos a lo largo de la placa bipolar y asumiendo que a lo largo de ella existe una variabilidad del voltaje debido a distribuciones no homogéneas de las corrientes. En este estudio se define que la distribución de las celdas fallidas puede afectar la distribución de corriente y voltaje de las celdas vecinas.

(Boškoski, Debenjak, & Boshkoska, 2017) Proponen un método de evaluación de una pila de combustible aplicando diferentes fallas de gestión del agua, para lo cual desarrollan un dispositivo de adquisición de datos de bajo costo capaz de realizar medición de celdas individuales dentro de una pila de celdas de combustible HD 8 producido por la Hydrogenics Corporation con capacidad de 8,5kW y que consta de hasta 90 celdas. Además, proporciona una plataforma para realizar mediciones de EIS en cada celda de la pila. Con este sistema se pueden realizar mediciones de EIS rápidas sin interrumpir el funcionamiento normal del dispositivo electroquímico bajo prueba.

Luo & Jian (2019) investigaron utilizando una pila PEM, estrategia para mitigar el efecto de inanición que ocurre en las celdas por la falta de hidrógeno en operaciones cambio rápido de carga y distribución desigual del flujo. Para realizar esto, reemplazaron la válvula de purga de una vía por una de tres vías para permitir una entrada extra de hidrógeno al stack. Con esta configuración, se obtuvo un aumento de un 10,67% de potencia en la pila y, por ende, se concluye que existe un aumento del voltaje de las celdas al aumentar el contenido de hidrógeno en el canal de flujo del ánodo aguas abajo. Esta técnica reduce las fluctuaciones en el voltaje de las celdas y mejora su uniformidad. Las medidas de celdas individuales son realizadas con el equipo de medidas multicanal (GM10, Yokogawa Electric Corporation, Japan) que permite hasta 420 entradas analógicas.

Huang, Zhao, & Jian (2019) desarrollaron un sistema de adquisición utilizando un sistema multicanal (Smart DAC+GM, Yokogawa Electric Corp., Japan) capaz de medir 40 canales. Con este sistema estudiaron el comportamiento del voltaje de la pila de combustible cuando ocurre inanición o falta de combustible (starvation) y propusieron una técnica para resolver este estado, utilizando hidrógeno a alta presión desde la salida del ánodo, siendo efectiva para mejorar el rendimiento en la operación dinámica de este sistema.

(Giacoppo, Hovland, & Barbera, 2019), realizan ensayos de desempeño de funcionamiento con una pila de combustible conformada por dos stack interconectados para verificar su funcionamiento en operaciones o perfiles de carga variable a lo largo del tiempo, representativos de diferentes misiones de exploración de la superficie lunar. Para lo cual desarrollan un sistema de monitorización conformado por una estación de prueba fabricada por "Lynntech" para el control de diferentes parámetros de flujo (velocidad de flujo, temperatura y humedad relativa). Con este sistema se pudo obtener la distribución del voltaje a lo largo de la pila de combustible, realizando

mediciones por celdas individuales en operaciones de circuito abierto y con carga variable, además de realizar un seguimiento del voltaje del stack y la corriente. Observaron una distribución homogénea en celdas y por otro lado demostraron un alto rendimiento y potencial de estos sistemas en las aplicaciones espaciales

Por último, se pueden mencionar técnicas que utilizan distintas herramientas de diagnóstico, junto con medidas de voltajes en celdas individuales como lo es el caso de Hua et al. (2019), quienes proponen una metodología basada en análisis de curvas de polarización y la técnica EIS (espectroscopia de impedancia electroquímica) para obtener parámetros internos de la celda y, como último paso, medidas en celdas individuales para apoyar las dos primeras técnicas. Con esta metodología se puede obtener información en cuanto a la uniformidad de voltaje en celdas y el rendimiento obtenido por medio de la curva de polarización y resistencias internas de cada una de las celdas que componen el stack.

(Don Baik & Ho Yang, 2020) utilizan curvas de polarización y medidas en celdas individuales de una pila de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto de 20 celdas para investigar el rendimiento de la misma al utilizar una estructura de separador de celdas con múltiples orificios, con lo cual se verifica un aumento en el rendimiento de la pila y se exhibe una mejora en la uniformidad de voltajes en celdas en regiones de mayor corrientes.

Para realizar la presente tesis, se ha utilizado la técnica de diagnóstico de medidas de voltajes por celdas, para lo cual se ha desarrollado un sistema de monitorización multicanal que permite realizar la caracterización de una pila de combustible de la marca Ballard Nexa compuesta por 47 celdas y con una potencia de 1.2Kw. La arquitectura del sistema se basa en cinco elementos principales: fuentes de señales de entrada, elementos de acondicionamiento de señales, elementos de procesamiento de señales, instrumentos de medición e instrumentos de registro gráfico.

1.10 Justificación

La realización de esta tesis doctoral tiene el propósito de impulsar el desarrollo de tecnologías de generación de energía eléctrica renovables, en específico, las pilas de combustible, por medio de su estudio y caracterización utilizando herramientas de diagnóstico, como el que se desarrolla en esta tesis doctoral, a través de la construcción de un sistema de monitorización multicanal para mediciones en tiempo real de 47 celdas que componen una pila de combustible Ballard Nexa de 1.2Kw. Con el desarrollo del sistema propuesto, se podrá conocer más a fondo el comportamiento de estos sistemas, proponer medidas para mejorar y optimizar su funcionamiento al momento de utilizarlas como fuente de generación renovable y proporcionar un aporte científico que sirva de base para una transición hacia tipos de energías que coadyuven a mitigar los efectos de

los gases de efecto de invernadero.

1.11 Objetivos

1.11.1 General

El objetivo principal es realizar la caracterización de una pila de combustible tipo PEM de 1.2Kw de la marca Ballard Nexa para analizar su comportamiento ante distintos perfiles de funcionamiento y verificar su pérdida de rendimiento, sometiéndola a diferentes regímenes de operación y realizando pruebas en modo reversible (circuito abierto) e irreversible (carga externa). Para ello, se ha diseñado, construido y validado un sistema de monitorización multicanal que opera en tiempo real, utilizando instrumentos virtuales que permiten el análisis numérico, visualización, almacenamiento y procesado de datos.

1.11.2 Específicos

1. Diseñar y configurar la arquitectura de un sistema de monitorización multicanal que opere en tiempo real como plataforma experimental para el seguimiento de temperaturas, corriente, voltaje del stack y de los voltajes generados en cada una de las 47 celdas que componen una pila de combustible Ballard Nexa de 1.2Kw.

2. Desarrollar la programación de un software que sirva de base para la creación de un instrumento virtual que permita, además de la comunicación con el módulo de adquisición (DAQ), el almacenamiento, descarga y visualización de los datos generados por nuestra arquitectura experimental.

3. Validar el sistema de monitorización a través de un modelo matemático y utilizando laboratorio de ensayos compuesto principalmente por tanque de almacenamiento de hidrógeno, fuente de energía Freak EP-603, carga eléctrica Prodigit 3260 y software de adquisición y monitorización.

1.12 Contenido y estructura de la tesis

Esta memoria de tesis consta de 5 capítulos organizados de la siguiente forma:

1. Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Se expone la importancia y motivación de la investigación que se propone con la realización de esta tesis doctoral, definiendo de manera general y específica los objetivos que se persiguen y realizando una revisión del estado de arte en cuanto a técnicas de caracterización y diagnósticos de pilas de combustible.

2. Capítulo 2: **METODOLOGÍA**

Contiene la metodología experimental, que describe el montaje y arquitectura que se desarrollaron para llevar a cabo la tesis doctoral, incluyendo una descripción detallada de los componentes del sistema de monitorización multicanal, desde el diseño y la programación del software, hasta los componentes electrónicos que se utilizaron para adquirir las diferentes señales de la Pila PEM.

Asimismo, se describen los diversos ensayos realizados con el sistema de monitorización multicanal, los cuales se han dividido en dos grupos principales:

- Operación estática: Sometiendo la pila de combustible a diferentes cargas externas, que permiten obtener las curvas características (polarización) de la misma y comprobar su funcionamiento para las diferentes condiciones de carga.
- Operación dinámica: Aplicando diferentes perturbaciones del sistema (operaciones de arranque, parada, purgas del sistema) y variación regular e irregular de carga.

3. Capítulo 3: **RESULTADOS y ANÁLISIS**

Se exponen los resultados experimentales obtenidos del funcionamiento del sistema de monitorización multicanal a lo largo del desarrollo de la tesis, abordando los diferentes análisis y su respectiva discusión.

4. Capítulo 4: **CONCLUSIONES**

Recoge las conclusiones más relevantes que se han podido extraer de la investigación en esta tesis doctoral.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1 Metodología

En este capítulo se hace una descripción de la arquitectura desarrollada para la construcción y montaje del sistema de monitorización multicanal en tiempo real, así como cada uno de los elementos que lo conforman y su funcionamiento. Adicional a esto, se incluyeron aspectos de la programación del sistema, como el desarrollo de los instrumentos virtuales que permitieron adquirir las señales analógicas de voltaje de cada una de las celdas de la pila de combustible, además de variables como las temperaturas y corriente del stack.

Por último, se describe la configuración del panel de usuario que constituye una parte fundamental, ya que permitió visualizar y descargar datos y gráficos, así como controlar el tiempo de muestreo de las diferentes variables implicadas en el funcionamiento de este sistema. Asimismo, se describen los diferentes ensayos llevados a cabo con base en el prototipo desarrollado.

2.2 Arquitectura del sistema de monitorización

Se empleó un sistema de adquisición de datos (DAQ), que consiste en la integración de sensores, hardware de mediciones y un ordenador al que se integra un software desarrollado específicamente para la monitorización de las variables implicadas en el funcionamiento de la pila de combustible. En el diseño se identifican cinco elementos principales: señales de entrada, elementos de acondicionamiento y procesamiento de señales, instrumentos de medición y despliegue de datos y por último los instrumentos de registro gráfico.

Los componentes físicos que se utilizaron para la construcción del sistema de monitorización son: equipos de adquisición de datos (DAQ NI-USB 6225, DAQ NI-USB 6008 y DAQ NI-USB 6218), pila de combustible Ballard Nexa de 1.2Kw, carga electrónica Prodigit 32612, dos fuentes de alimentación EP-603, sistema de almacenamiento de hidrógeno (bombona de hidrógeno al 99,9992%) y los sensores para medición de variables (corriente HTB -100 y sensores de temperatura LM-35). A su vez, se diseñaron y construyeron dos tarjetas de acondicionamiento de señal conformadas por amplificadores de aislamiento ISO 124P, convertidores DC-DC aislados AS-1WR2, condensadores de desacoplo de 1 μ F (cerámicos) y 10 μ f (electrolíticos) y diodo rectificador 1N4005, como elementos principales.

Con este prototipo se pretende analizar el desempeño y caracterización de una pila de combustible de intercambio protónico ante diversas operaciones (reversibles o irreversibles) y estados (estacionario, transitorio). Todo ello, por medio de un seguimiento del voltaje generado en

celdas individuales para verificar fallos que puedan ocurrir en alguna de ellas y que, por ende, pueda afectar a la operación del stack.

Además de lo anterior, se realizaron diferentes pruebas, aplicando escalones de carga fija y variable, seguimiento de temperaturas al introducir variaciones de carga externa, generar curva de polarización y operaciones sin carga y con carga externa. Asimismo, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en dos pilas de combustible del mismo modelo para verificar y validar el prototipo.

Con todo lo anterior, la aplicación de este sistema de adquisición en tiempo real va dirigida mayormente al área de la investigación de pilas de combustible de intercambio protónico, cuyo propósito primordial es la caracterización, el análisis y diagnóstico de fallos y condiciones de operación que afecten su durabilidad y eficiencia. En la figura 2.1 se ilustra el diagrama esquemático de la arquitectura desarrollada, que será explicado en detalle en los próximos apartados:

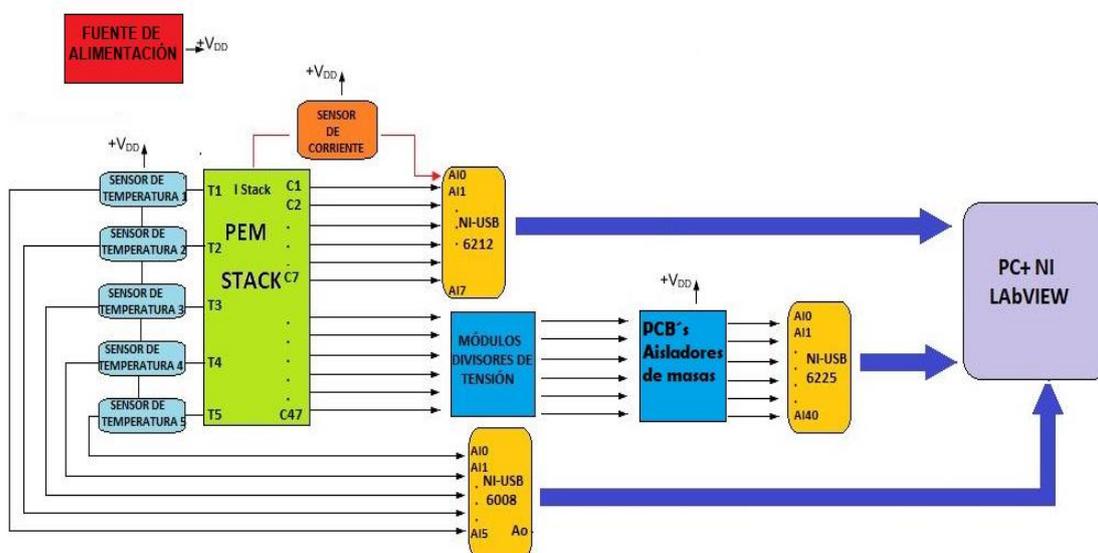


Figura 2.1. Diagrama esquemático del sistema de monitorización multicanal desarrollado.

2.3 Componentes del Sistema de Monitorización

En este capítulo se hace una descripción detallada de cada uno de los componentes del sistema de monitorización desarrollado en tiempo real. En primer lugar, se describe el corazón o elemento principal del sistema, que es el módulo Ballard Nexa de 1.2 Kw, para luego describir los diferentes sensores y tarjetas de acondicionamiento de señal utilizados en el diseño del prototipo.

2.3.1 Fuente de alimentación EP-603

Es una fuente de alimentación DC regulada que proporciona un voltaje constante y cuenta con dos salidas de 5V y 12V que brindan una corriente entre 0 -500mA y una tercera salida que permite voltajes entre 0 - 30V, con una corriente máxima de 2.5 A.

En el diseño se utilizaron dos fuentes de alimentación de este tipo con una configuración en simetría (figura 2.2), con el objetivo de proporcionar suministro de energía requerida a los sensores, a las tarjetas de acondicionamiento de señal y a los ventiladores de enfriamiento. Esto se logró utilizando la tercera salida de cada una de las fuentes que, como se mencionó, proporciona un rango de corriente entre (0-2.5A).



Figura 2.2. Conexión de Fuentes Ep-603 para alimentar distintos elementos del sistema de monitorización multicanal.

2.3.2 Módulo de batería de celdas Nexa Power™

Para realizar los ensayos se usó un sistema modular integrado modelo Ballard Nexa que incluye un apilamiento de celdas, tarjeta electrónica y equipos auxiliares. Las celdas que utiliza son del tipo membrana de intercambio protónico (PEM - Polymer Electrolyte Membrane) o pila de membrana de electrolito polimérico, que emplea un polímero de membrana como electrolito.

Esta pila es capaz de proporcionar hasta 1200W de potencia, a un voltaje nominal de salida de 26 VDC. En la figura 2.3 se puede observar el esquema de funcionamiento del módulo:

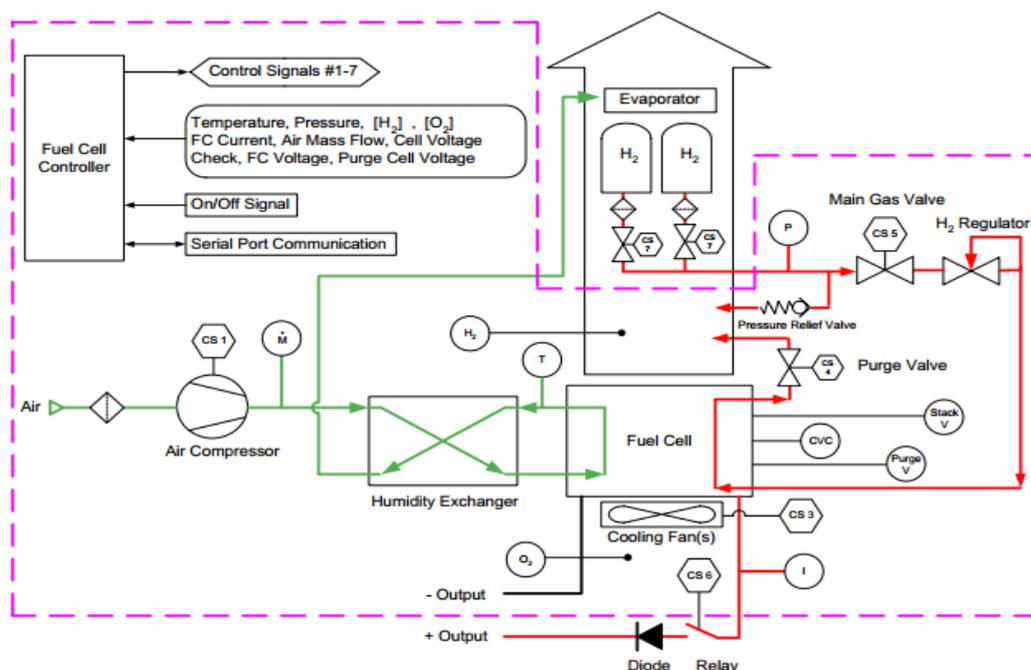


Figura 2.3. Esquema de funcionamiento del Módulo Nexa Ballard. Tomado de "Nexa TM Power Module User's Manual" de Ballard, 2003, p. 2, Copyright © 2003 Ballard Power Systems Inc.

En los siguientes apartados, se explicarán brevemente los elementos principales de este módulo:

2.3.2.1 Stack de la pila de combustible Nexa

El módulo de potencia Nexa cuenta con un apilamiento de 47 celdas conectadas en serie (figura 2.4) y es capaz de generar 1,2 kW de potencia neta. El voltaje de salida varía con la potencia, entregando un máximo de 43V cuando se encuentra en vacío y 26V cuando opera a plena carga:

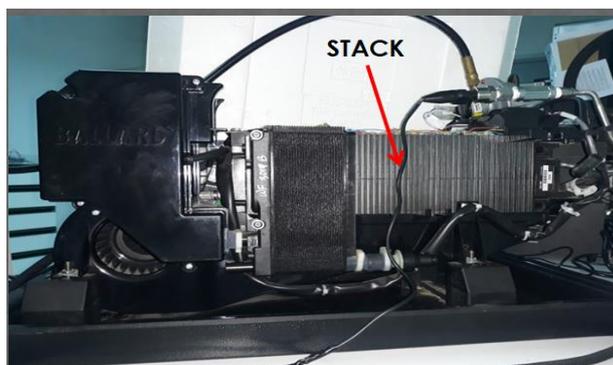


Figura 2.4. Apilamiento de MEAs que conforman el stack de pila de combustible Ballard Nexa de 1.2Kw.

2.3.2.2 Interfaces del módulo de Pila Nexa

El módulo Nexa incluye diferentes elementos para su operación, entre los cuales se pueden mencionar el regulador de presión de hidrógeno, las entradas y salidas de aire de refrigeración, las salidas de residuos (vapor y agua), la válvula de purga y el ventilador de refrigeración. Esto se muestra en la figura 2.5.

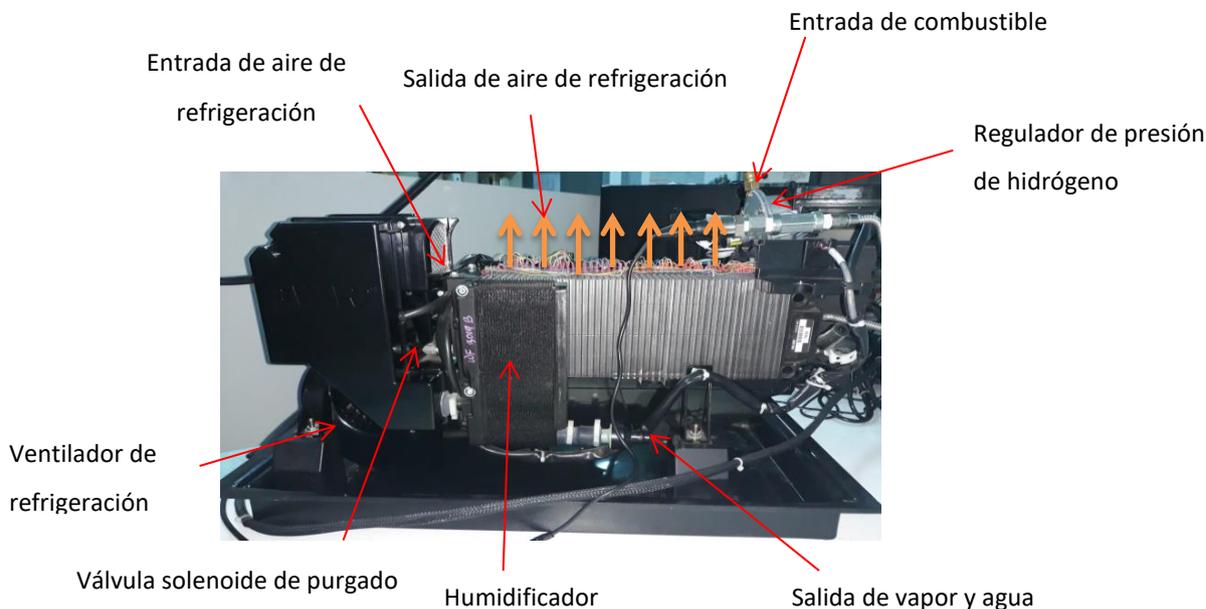


Figura 2.5. Elementos principales que conforman el módulo Ballard Nexa de 1.2kW.

En primera instancia, el conducto de entrada de combustible extrae el hidrógeno de la bombona de almacenamiento a una presión determinada por la válvula reguladora de la misma, de allí se introduce en la pila y pasa a través de un regulador de presión que ajusta el suministro de hidrógeno de entrada al sistema, dependiendo de los requerimientos del stack. Este regulador es del modelo Fisher 912N, cuyo rango de presión está entre 2.7 y 5 psi. La pila de combustible está diseñada para funcionar con hidrógeno puro en un 99.99% en estado gaseoso no humedecido. Este puede suministrarse a una presión de entre 70 kPa y 1720 kPa.

Del mismo modo, existe un sistema de purgado que permite extraer el exceso de agua y nitrógeno que se acumulan en la entrada, evitando así posibles obstrucciones en el sistema de alimentación. En este proceso de purgado se pierde solamente una ínfima cantidad de hidrógeno (menos de un 1% de la cantidad total consumida) y se libera en los canales de refrigeración para, de este modo, favorecer su difusión y evitar altas concentraciones que pudieran favorecer su ignición.

De manera general, los componentes del sistema de suministro de hidrógeno (figura 2.6) que supervisan y controlan el abastecimiento a la celda son:

1. Un transductor que monitorea la presión del combustible para asegurar un valor adecuado de abastecimiento durante el funcionamiento de la celda.
2. Una válvula de escape que previene condiciones de sobrepresión.
3. Una válvula de solenoide que permite aislar el sistema de abastecimiento de combustible durante el apagado.
4. Una válvula reguladora que mantiene un valor de presión apropiado para el abastecimiento de hidrógeno a la celda.
5. Un detector que monitoriza los niveles de hidrógeno presentes en los alrededores del stack y envía una señal al sistema de alarmas de alerta o de apagado.

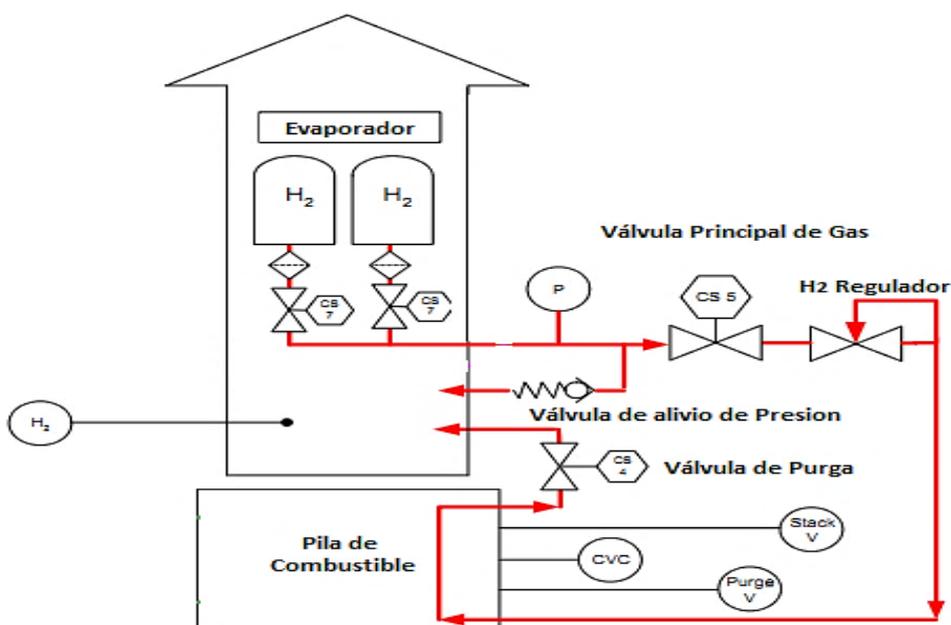


Figura 2.6. Suministro de hidrógeno. Adaptado de "Nexa TM Power Module User's Manual" de Ballard, 2003, p. 2, Copyright © 2003 Ballard Power Systems Inc.

El sistema toma aire de la atmósfera como oxidante, por medio de un compresor que entrega el aire oxidante necesario, así el aire del ambiente pasa por un filtro, que retiene partículas de hasta 10 μm , antes de ingresar al compresor, tal como se muestra en la figura 2.7. La velocidad del compresor se ajusta automáticamente para satisfacer la demanda de corriente de la celda.

El aire oxidante se debe humidificar antes de llegar a la celda, para mantener la saturación de la membrana y prolongar su vida útil. Esto se logra con un intercambiador de humedad que transfiere la humedad desde el agua producida por la celda al aire seco de entrada. Tanto el líquido como el vapor del agua producida, se descargan en la salida junto con el aire oxidante residual y el agua resultante se recolecta en un recipiente acondicionado para tal fin. El consumo máximo de aire es de aproximadamente 90 slpm (standard liter per minute).

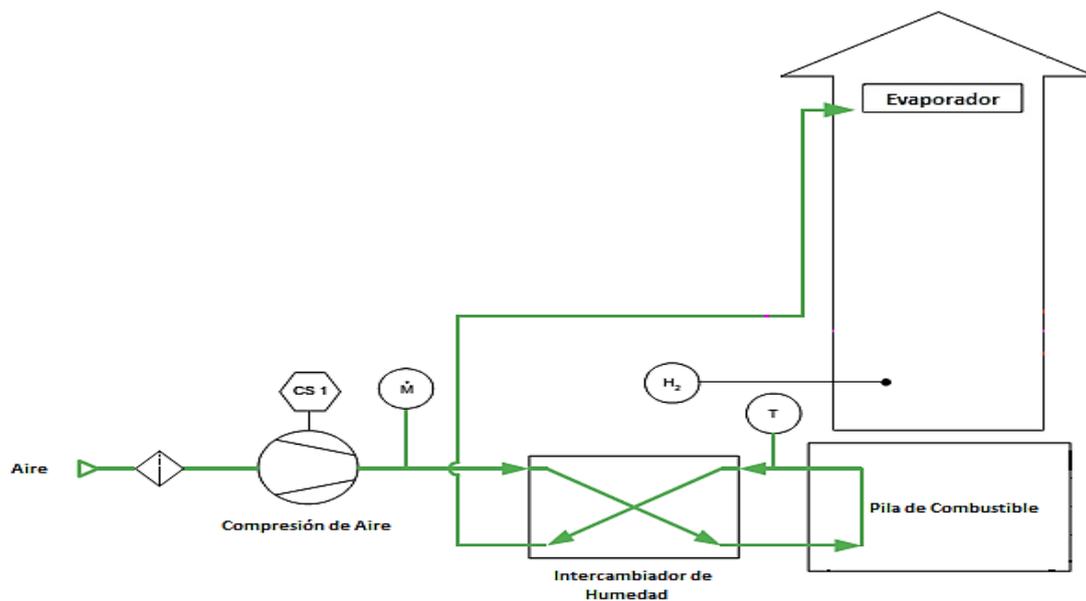


Figura 2.7. Sistema de suministro del aire. Adaptado de “Nexa TM Power Module User’s Manual” de Ballard, 2003, p. 2, Copyright © 2003 Ballard Power Systems Inc.

El sistema de refrigeración está formado por un ventilador situado en la parte baja del apilamiento, forzando la circulación de aire entre las distintas celdas mediante una serie de canales. El aire frío penetra por la parte baja de la pila de combustible, mientras que el aire caliente sale por la parte alta. El módulo Nexa se mantiene a una temperatura de 65°C. En la figura 2.8 se representa el funcionamiento de este sistema:

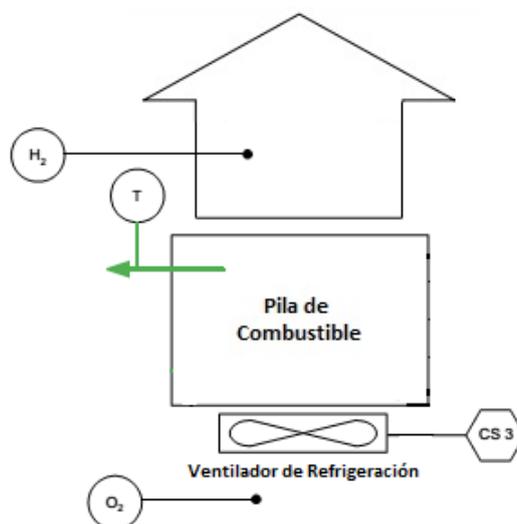


Figura 2.8. Sistema de refrigeración Adaptado de “Nexa TM Power Module User’s Manual” de Ballard, 2003, p. 2, Copyright © 2003 Ballard Power Systems Inc.

El producto excedente de agua desde la reacción de la celda combustible es arrastrado en el proceso de salida de la corriente de aire en ambas formas líquido y vapor, por medio de un conducto ubicado a un costado de la pila.

2.3.2.3 Sistema de alimentación eléctrica auxiliar

Durante el encendido, es necesario suministrar entre 18 y 30 VDC, para alimentar los sistemas auxiliares hasta que la pila entre en funcionamiento normal. Una vez en marcha, el sistema de celdas proporciona esta potencia. Por otro lado, durante el apagado de la pila, el sistema de suministro DC es reconectado para proporcionar la alimentación a los sistemas auxiliares hasta que el sistema llegue al estado apagado.

2.3.2.4 Sistema electrónico de control

El funcionamiento de la celda está automatizado mediante un sistema de control electrónico implementado en una placa de control donde se reciben señales desde los sensores integrados, como se muestra en la figura 2.9. Entre las señales que se controlan se pueden mencionar: la temperatura de la celda, la presión de hidrógeno, la concentración del escape de hidrógeno, la corriente de la celda, el flujo de la masa de aire, la tensión de la celda y tensión del purgado de celda. Los comandos de control se emiten para abrir y cerrar la válvula solenoide de control de hidrógeno y la válvula de purga del módulo Nexa. La velocidad del ventilador de aire es variada según la demanda requerida. La velocidad del ventilador también se controla para regular la temperatura de la pila de combustible.



Figura 2.9. Tarjeta o placa electrónica de control de la pila de combustible Nexa.

2.3.3 Sistema de alimentación de combustible

El hidrógeno que se utiliza para alimentar la pila es comprimido y de gran pureza, al 99.9992%, con niveles de O₂ menor a 1 ppm, N₂ menor que 5ppm y H₂O menor de 2 ppm. Su suministro se realiza utilizando una bombona comercial que utiliza un sistema de regulación de presión para reducir la misma hasta los intervalos de alimentación del módulo Nexa, como se muestra en la figura 2.10:



Figura 2.10. Bombona de hidrógeno comprimido utilizada para alimentar stack ballard Nexa 1.2Kw.

2.3.4 Sensores

En este apartado se describen los sensores que forman parte del sistema de monitorización y adquisición de datos.

2.3.4.1 Sensores de temperatura

Para realizar las mediciones de temperatura se han utilizado sensores analógicos integrados modelo LM-35 cuyas configuraciones se muestran en la figura 2.11. Estos sensores constan de 3 pines (+Vs = alimentación, Vout = Datos y GND = tierra) y tienen un encapsulado TO-92 (transistor outline package case style 92) de plástico. Produce una tensión de salida que varía en forma proporcionalmente lineal a la temperatura obtenida en grados centígrados.

El rango de medición del sensor está entre -55 °C a 150 °C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. La tensión de alimentación es de 4 a 30V y es calibrado directamente en grados centígrados con un

factor de escala de 10mV/°C.

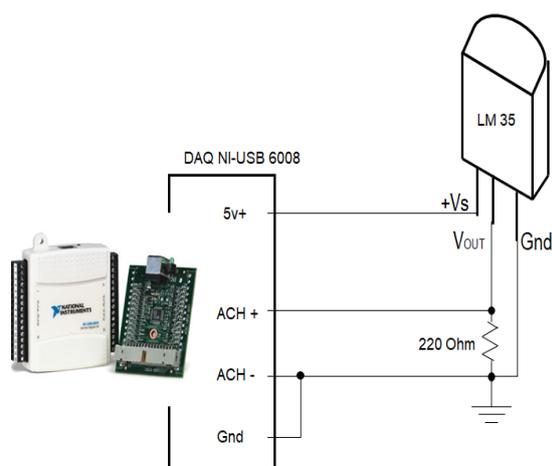
La señal del sensor LM-35 es recibida en milivoltios y se convierte en grados centígrados mediante una fórmula lineal, que se muestra a continuación:

$$T_{LM\ 35} = V_{salida\ (mV)} / 10 \quad (2.1)$$



Figura 2.11. Características físicas del sensor LM 35 utilizado para las mediciones de temperaturas en celdas.

Para el conexionado se alimentó el sensor con 5V en el pin (+Vs), para lo cual se habilitó la salida de la fuente externa con el fin de proveer de tensión a esta entrada. A su vez, para realizar las conexiones se integró una resistencia de 220 kΩ entre el Vout y Gnd para cada una de las señales de temperatura, como se muestra en la figura 2.12:



(c)



(b)

Figura 2.12. Conexión de LM 35: (a) Configuración de resistencia al LM-35, (b) Conexión de placa de resistencias al DAQ-NI-USB-6008.

2.3.4.2 Sensor de corriente HTB100-TP

El sensor utilizado para medir la corriente generada por la pila permite un máximo de 100A con salida de voltaje proporcional a la corriente de entrada. Este modelo HTB100-TP es adecuado para la medición electrónica de corrientes de CC y CA. Incluye un aislamiento galvánico entre el circuito primario (alta potencia) y el circuito secundario (circuito electrónico). Utiliza el principio de medición de efecto hall y además tiene alta inmunidad a la interferencia externa.

Para la toma de medidas, el sensor es instalado en el terminal positivo de la pila de combustible (figura 2.13).

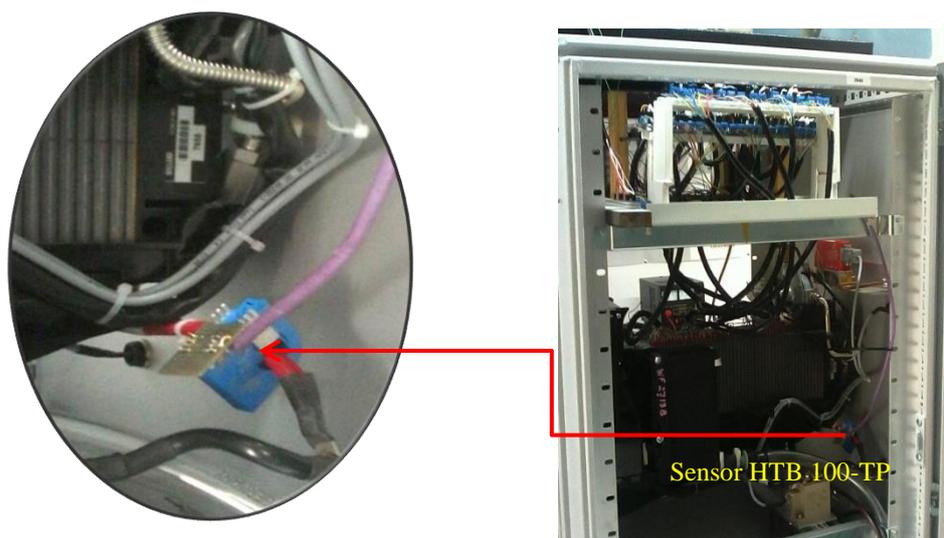


Figura 2.13. Sensor de corriente HTB 100-TP utilizado para medir la corriente generada por la pila.

Por otro lado, fue necesaria la curva de calibración para verificar la línea de tendencia que sigue la tensión respecto de la corriente tal y como muestra la figura 2.14. La ecuación fue introducida en la programación de labview para obtener el valor de intensidad del stack, en todas las pruebas realizadas.

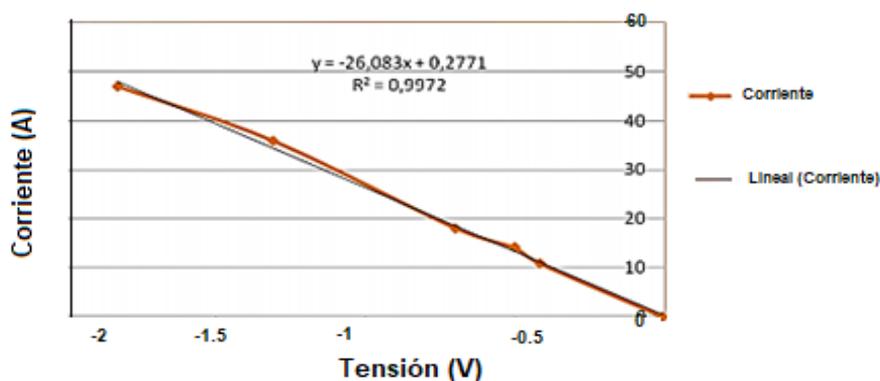


Figura 2.14. Curva de calibración Tensión vs corriente del Sensor HTB 100-TP.

2.3.4.3 Sensor de presión

Para obtener la presión de hidrógeno suministrada a la pila de combustible, fue necesario elegir entre una cantidad de sensores existentes en el mercado, cuyo rango de operación estuviera entre 2.7 a 5 psi. A su vez, la salida analógica de voltaje no tenía que exceder 10 voltios, que era el máximo permitido por el módulo NI-USB 6008. Este sensor se muestra en la figura 2.15:

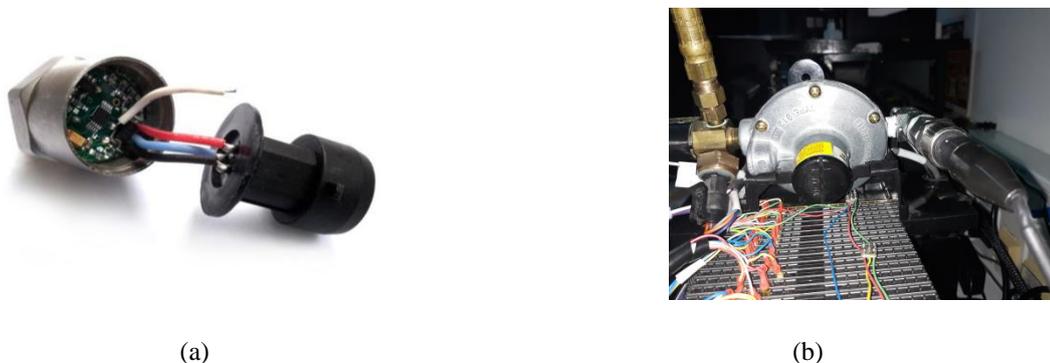


Figura 2.15. Sensor de presión: (a) Conexiones, (b) Montaje a la salida del regulador de presión.

Entre las especificaciones de este sensor están la salida de voltaje en el rango de 0-4.5 V salida lineal y la exactitud $\pm 0.5\%FS$ con una entrada tipo 1/8 "NPT, por lo cual fue necesario utilizar un adaptador para el acople con la entrada de la pila de combustible. La temperatura de operación de este dispositivo está en el rango de $40\text{--}+120^{\circ}C$.

Para poder obtener una relación entre el voltaje generado con el sensor y la presión de entrada a la pila, se obtiene la curva de calibración de la figura 2.16. La ecuación obtenida es insertada en la programación del sistema:

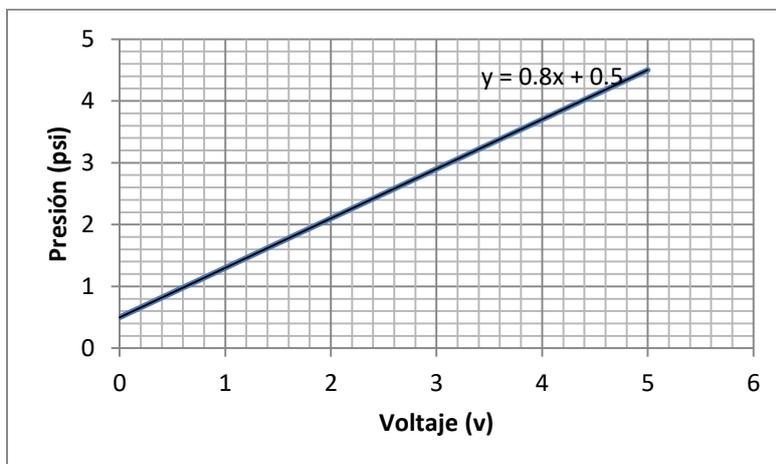


Figura 2.16. Curva de calibración presión vs voltaje sensor de presión instalado en la entrada del combustible (H_2).

2.3.5 Módulos de Adquisición de Datos DAQ (Data acquisition Systems)

En el sistema se trabaja con señales analógicas, las cuales se tienen que convertir en digitales para poder ser procesadas por el ordenador. Por tal motivo, fue necesario utilizar módulos de adquisición DAQ, que son dispositivos que acondicionan las señales de entrada y que cuentan con convertidores analógico–digital y digital–analógico para poder enviar datos digitales a nuestro ordenador por medio de un bus de PC.

Los sistemas DAQ utilizados en las pruebas son los modelos NI USB-6218, NI USB-6225 y NI USB-6008. El primero ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de un solo canal a 250 kS/s, dos salidas analógicas, ocho líneas de entrada digital, ocho líneas de salida digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 a ± 10 V) por canal. La tarjeta de adquisición de datos NI USB-6225 cuenta con 80 entradas analógicas (16 bits, 250 kS/s), 2 salidas analógicas (16 bits a 833 kS/s), 24 E/S digitales (8 controladas por reloj), mientras que el módulo NI USB-6008 cuenta con 8 entradas analógicas (12 bits, 10 kS/s), 2 salidas analógicas (12 bits) y contador de 32 bits. Estos módulos se muestran en la figura 2.17.

Todos los módulos, excepto el NI –USB 6225, utilizan la instalación plug-and-play, lo cual minimiza el tiempo de configuración y montaje y permiten su alimentación a través de una conexión USB, lo cual elimina la necesidad de utilizar fuentes de potencia externa.

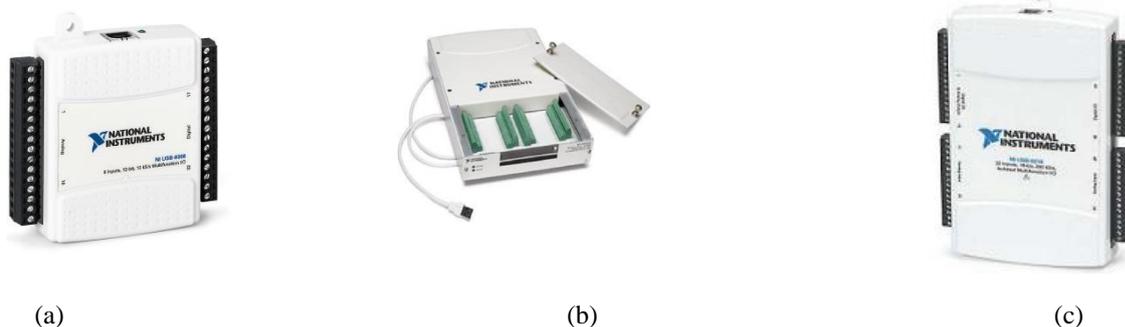


Figura 2.17. Módulos DAQ utilizados: (a) NI-USB 6008, (b) módulo NI-USB 6225, (b) módulo NI-USB 6218.

Los sistemas DAQ permiten la conexión de múltiples entradas analógicas y disponen de distintas configuraciones para la conexión de señales de entrada, entre las cuales cabe mencionar la conexión diferencial y la conexión RSE (Reference single end).

En el tipo de conexión diferencial se necesitan dos terminales, uno positivo y otro negativo. En el caso del negativo, no necesariamente tiene que ser igual a tierra. Por otro lado, en la conexión

denominada RSE (Referenced Single Ended), los terminales de entrada al DAQ corresponden con los terminales positivo y tierra de la señal medida, como se muestra en la figura 2.18:

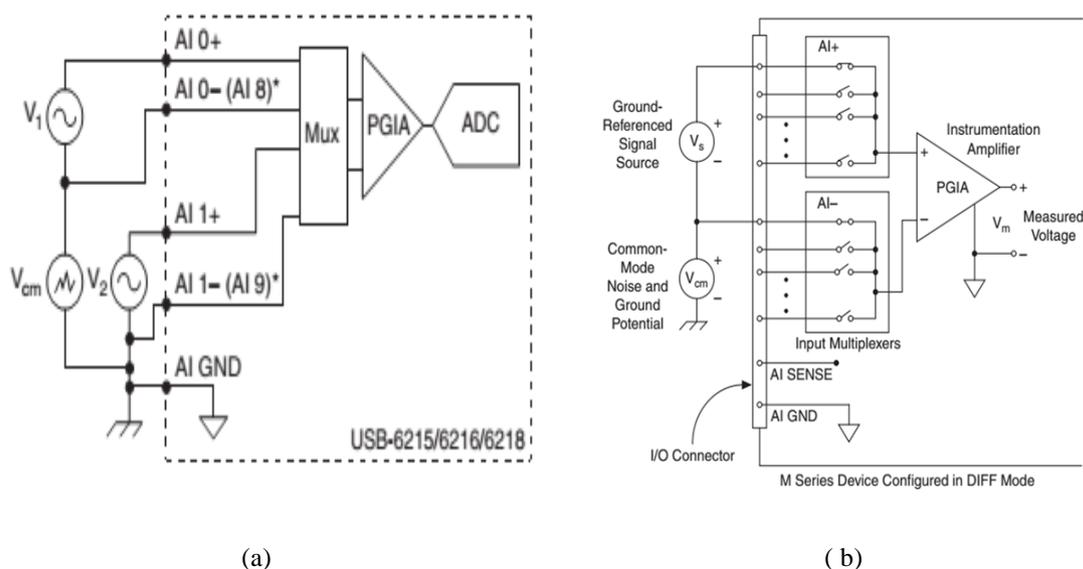


Figura 2.18. Diagramas de conexiones con los módulos de adquisición DAQ para medidas de voltajes: (a) Conexión diferencial para el módulo NI-USB 6008 (7 celdas), (b) Conexión diferencial para el módulo NI-USB 6225(40 celdas).

El módulo NI USB-6225 permite obtener 40 entradas analógicas en modo diferencial y 80 en modo RSE. En nuestro caso, se empleó el modo de medición diferencial, ya que con este método de conexión se elimina el voltaje de modo común presente en las entradas del amplificador de instrumentación (interno del DAQ) con respecto a la tierra, por lo cual se consigue obtener medidas más precisas que en el modo RSE.

Una desventaja de la configuración diferencial es que necesita ocupar dos entradas analógicas para el conexionado de cada una de las señales, por lo cual sólo teníamos acceso a 40 entradas diferenciales, obligandonos a utilizar otra tarjeta que nos permitiera medir las 7 celdas restantes y completar así el total de 47 celdas (figura 2.19).

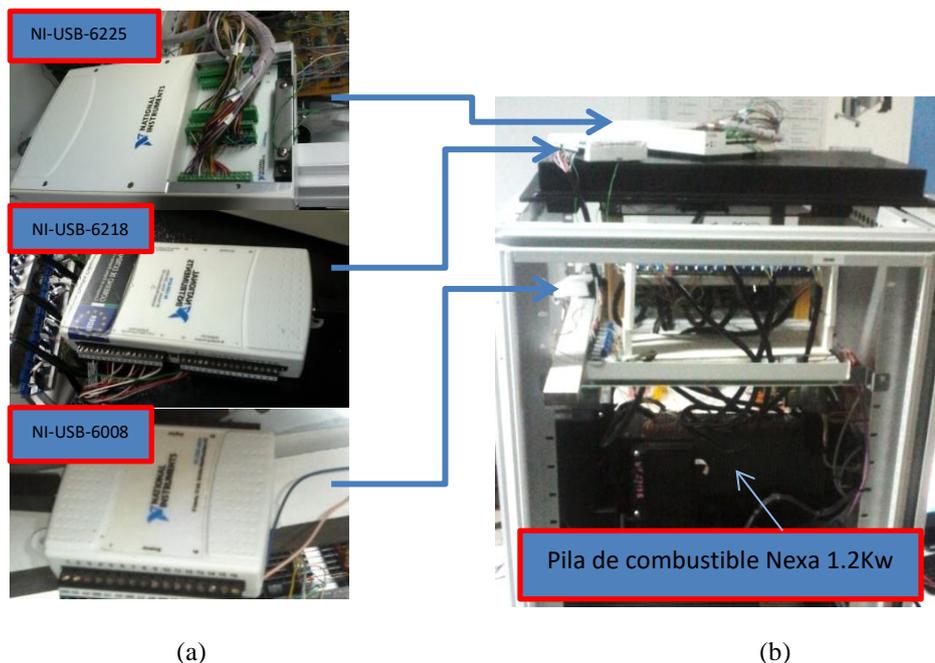


Figura 2.19. Conexión de sistemas de adquisición de datos (a) Dispositivos DAQ utilizados para la adquisición de datos (NI-USB (6225, 6218,6008)), (b) Configuración física del montaje de módulos.

Un aspecto importante que se tuvo que considerar al momento de realizar las conexiones de las señales de tensión provenientes de la pila de combustible, fue el voltaje de modo común de estas tarjetas, que en el caso de las tarjetas DAQ de la Serie E —al cual pertenece el DAQ-NI-USB 6225—, el máximo es ± 11 V y para el DAQ 6218 es de ± 10.4 V. Por lo cual, a pesar de que los voltajes que se manejaban por celda era de aproximadamente 1V, una magnitud bastante pequeña, el voltaje de modo común de todas las medidas era de 47V máximo, lo cual excedía el rango de estos dispositivos. Dado que la mayoría de los dispositivos DAQ tienen entre 20-40V de protección de alto voltage, esto no debería dañar la tarjeta DAQ. Sin embargo, puede provocar lecturas no predecibles y posiblemente imprecisas (National Instrument, 2008).

Para solucionar este inconveniente, fue necesario diseñar un circuito que fuera capaz de aislar las masas de cada señal (40 señales analógicas), para que fuera posible realizar las conexiones al DAQ-NI-USB 6225. El diseño fue realizado utilizando amplificadores modelo ISO 124P, que además de aislar las entradas de la salidas, tienen ganancia unitaria, lo cual resultó de beneficio, ya que solo se buscaba aislar las señales sin modificar su magnitud. Esta configuración se explica a continuación.

2.3.6 Placa de aislamiento PCB

Dentro de los componentes utilizados para el diseño y construcción de las placas PCB's de aislamiento de masas, se pueden mencionar cuatro componentes principales: (1) el amplificador de

aislamiento, (2) los convertidores aislados, (3) los capacitores de desacoplo y (4) los conectores de entradas y salidas, todo lo cual se muestra claramente en la figura 2.20:

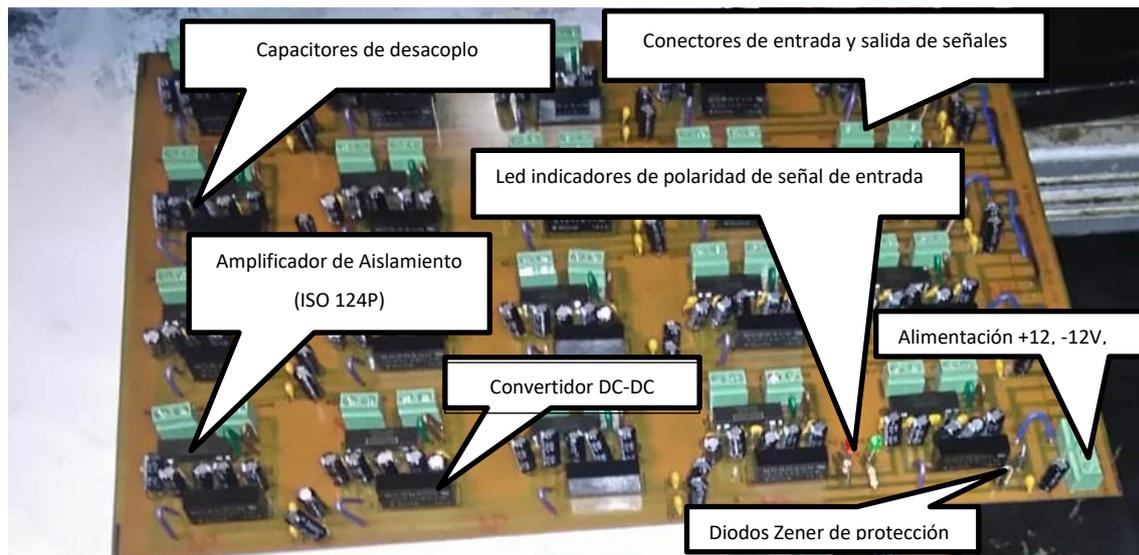


Figura 2.20. Placa PCB acondicionador de señal (circuito con amplificador de aislamiento y convertidores DC-DC).

En el diseño de las placas PCB de aislamiento de señales, se utilizaron dos placas de 20 x 27 cm, configuración que permitía mayor facilidad para realizar las conexiones y ahorro de espacio para el montaje en estructura de enfriamiento.

Se decidió ubicar los diferentes componentes dependiendo de los elementos externos que se debían que conectar, como la pila de combustible, las fuentes de alimentación externas y las salidas hacia los sistemas de adquisición de datos. Para el diseño se utilizó el programa Altium Designer 17.1 y se obtuvo el diseño que se muestra en la figura 2.21:

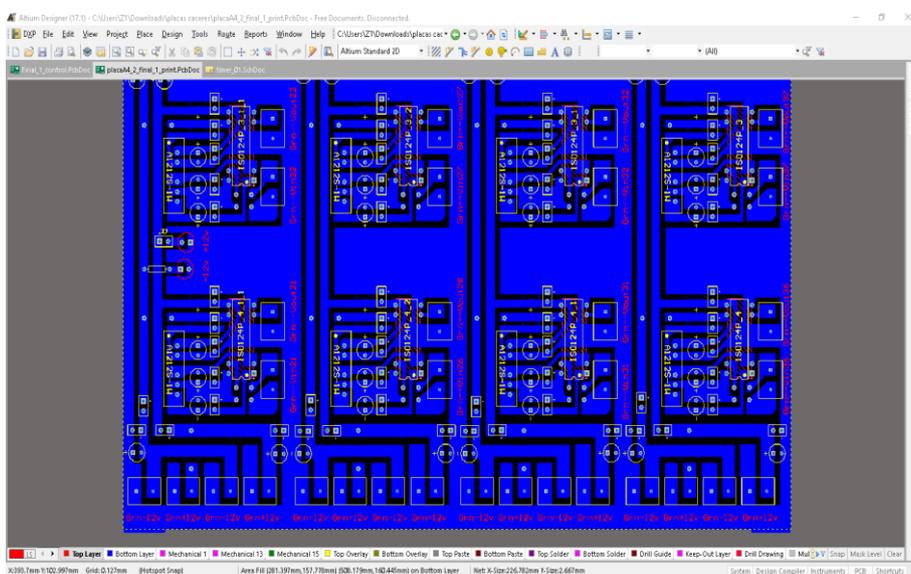


Figura 2.21. Diseño de circuito electrónico en Altium Designer 17 para la construcción de la placa de acondicionamiento de señales.

2.3.6.1 Amplificador de Aislamiento ISO 124P

Los amplificadores de aislamiento se utilizan para medir tensiones o corrientes de baja frecuencia o continuas, que estén sometidas a altos voltajes en modo común. Al aislar galvanicamente la señal de entrada de la señal de salida se proporciona seguridad frente a altas tensiones en modo común que puedan introducirse en la entrada.

Estos amplificadores se utilizan para diversas funciones, entre las cuales cabe mencionar: 1) cuando se debe medir una señal (diferencial) superpuesta a señales en modo común importantes; 2) cuando no pueden usarse referencias de tensión comunes; 3) cuando es importante el aislamiento eléctrico por cuestiones de seguridad. El amplificador de aislamiento transmite la señal obtenida de una referencia a otra sin la componente de modo común (Guerrero Martínez, 2011).

En este proyecto se usó el amplificador ISO 124P con el propósito de aislar las referencias de tensión comunes en 40 señales provenientes del stack de la pila de combustible. Esto fue así ya que las 7 restantes se conectarían directamente al sistema de adquisición DAQ-NI-USB 6218, sin utilizar aislamiento de masas.

En este amplificador la señal de entrada es modulada digitalmente y pasa a través de una barrera capacitiva de 2pF. Además, requiere de dos fuentes de alimentación para aislar referencias de tensión comunes entre la entrada y la salida, como se muestra en la figura 2.22. Este dispositivo está disponible en un encapsulado de 8 pines y sus características principales son:

- Aislamiento de 1500VRMS.
- Capaz de aislar señales bipolares.
- Modulación por ciclo útil.
- Barrera de aislamiento de 2pF.
- Tensión de alimentación: 4,5 V a 18 V.

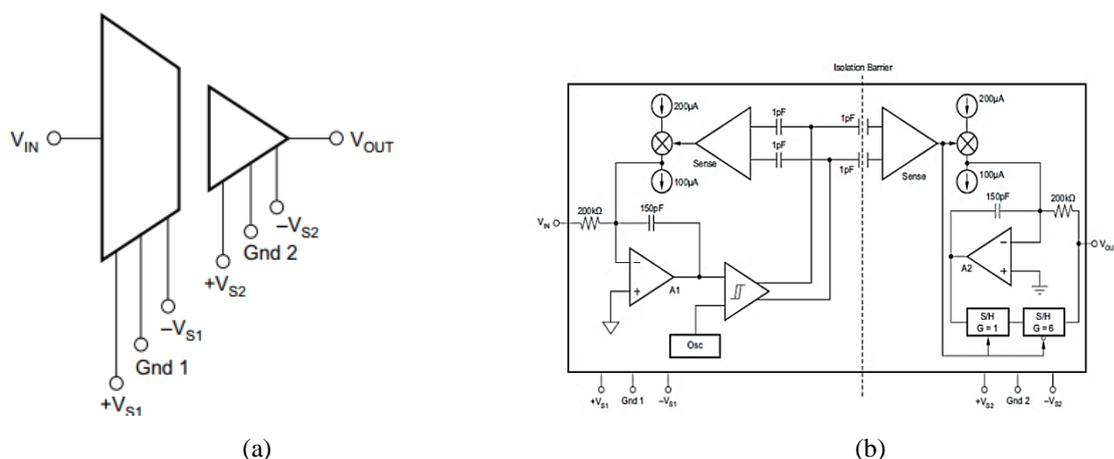


Figura 2.22. Esquema de configuración del ISO 124P: (a) Señales de entrada y salida del ISO 124P, (b) Diagrama bloque de los componentes del ISO 124P.

De manera general, el funcionamiento de estos amplificadores de aislamiento se lleva a cabo en tres etapas. En la primera, se toma la señal de entrada y se amplifica para pasar luego a un demodulador. En la segunda fase, la señal pasa por una barrera de aislamiento capacitivo de 1pF. La entrada es modulada y transmitida digitalmente a través de la barrera. Por último, el circuito de salida recibe la señal modulada y la convierte de nuevo en un voltaje analógico eliminando el rizo inherente a la modulación (Texas instrument, 2018).

2.3.6.2 Convertidor DC/DC AS-1WR2

Como se indicó en el anterior apartado, para utilizar los amplificadores de aislamiento ISO 124P es necesario contar con dos fuentes de alimentación, independientes y aisladas, sobre todo para no perder el aislamiento de los puntos de referencia de cada bloque. Además, los niveles de tensión de alimentación se han de mantener estables para evitar acoplamiento de perturbaciones en la señales de salida.

Los ISO 124P son capaces de trabajar con señales de alimentación entre ± 4.5 y ± 18 V DC. En el sistema en cuestión, todas las entradas de los 40 convertidores utilizados en la placa fueron alimentadas con dos fuentes conectadas en serie, ajustadas a una tensión de ± 12 Vdc, en el lado de la entrada, y en el lado de la salida se alimentaron con los convertidores AS-1WR2, uno por cada señal de voltaje en celda.

En el mercado se encuentra el convertidor DC/DC Mornsun que se muestra en la figura 2.23, modelo AS-1WR2. Estos convertidores son dispositivos que trabajan a 1W de potencia y tienen una salida dual de tensión.

Con esta configuración se logró generar las tensiones necesarias para operar correctamente cada uno de los amplificadores de aislamiento, reduciendo la cantidad de líneas de potencia externa.



Figura 2.23. DC/DC Converter AS-1WR2 utilizado como fuente de alimentación de cada etapa de aislamiento de señales.

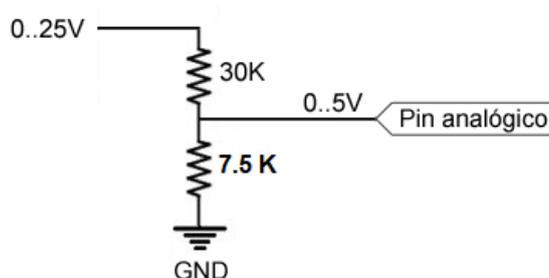
Las características principales de estos convertidores S-1WR2 son:

- Rango de temperatura de funcionamiento: -40 a + 105
- Alta eficiencia hasta 80%
- Voltaje de aislamiento: 1.5K VDC
- Alta densidad de potencia
- No se requiere componente externo
- 1W, voltaje de entrada fijo, aislado y no regulado
- Salida dual

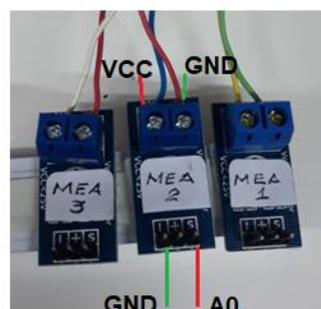
2.3.6.3 Módulos FZ0430 divisor de tensión

El sistema de acondicionamiento basado en salidas aisladas fue suficiente para realizar las medidas con el DAQ-NI-USB 6225. Sin embargo, se usaron divisores de tensión modelo FZ0430 para asegurar una operación con niveles de voltajes bastantes bajos para tener doble seguridad y evitar daños a los módulos de adquisición de datos (DAQ).

Los módulos FZ043, mostrados en la figura 2.24, son divisores de tensión con resistencias de 30kΩ y 7.5kΩ, que permiten medir tensiones de hasta 25V. Tienen dos tornillos de entrada que corresponden, en este caso, a los terminales entre celdas, las cuales son percibidas tras el módulo y son divididas por un factor de 5 ($7.5/(30+7.5)$). Por tanto, la tensión máxima que se obtienen con estos módulos es una tensión con una relación 5:1, para un voltaje de celda de 1V, que es valor aproximado que se obtiene en la operación sin carga externa. Este valor fue de 0.2 V.



(a)



(b)

Figura 2.24. Módulos FZ0430: (a) Configuración del divisor de tensión, (b) conexión de divisores de tensión (entradas provenientes de celdas Vcc y Gnd) y salidas al DAQ NI-USB 6225 (A0 y Gnd).

2.3.6.4 Filtros capacitivos de desacoplo

Los condensadores de desacoplo son útiles en muchos tipos de circuitos donde el ruido necesita ser eliminado o limpiado en una fuente de alimentación de corriente continua. En este diseño se incluyeron capacitores de desacoplo en todos los pines V_{CC} y GND, tanto del amplificador ISO 124P, como en los convertidores DC-DC.

No todos los capacitores físicos son adecuados para desacoplo de circuitos digitales. Algunos capacitores (tales como los electrolíticos o de tantalio) contienen una inductancia residual que debilita el efecto de desacoplo en frecuencias altas, pero son adecuados para reducir *ripple* y ruido de baja frecuencia. Los capacitores cerámicos de disco tienen un buen comportamiento en frecuencias altas, y su costo es bajo (Vignolo, 2008). La configuración de los capacitores de desacoplo de las tarjetas incluye la conexión de dos capacitores en paralelo uno cerámico de $0.1\mu\text{F}$ y el otro de $10\mu\text{F}$, el primero para eliminar ruido de alta frecuencia y otro de baja, con lo cual se consigue obtener una señal mejorada de la respuesta de voltajes en cada una de las celdas.

En la figura 2.25 se muestra la configuración de capacitores de desacoplo de la placa de aislamiento:

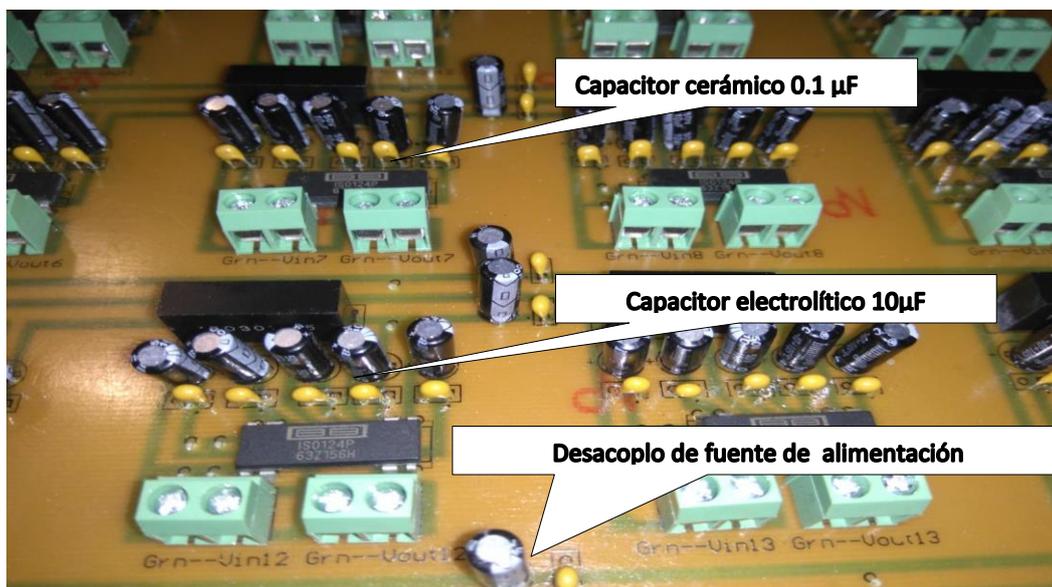
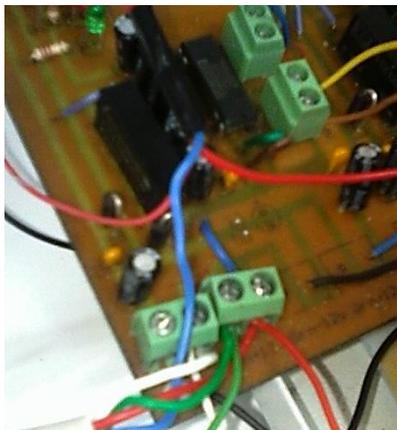


Figura 2.25. Capacitores de desacoplo conectados a las fuentes de alimentación VCC y GND de los amplificadores de aislamiento y convertidores DC-DC.

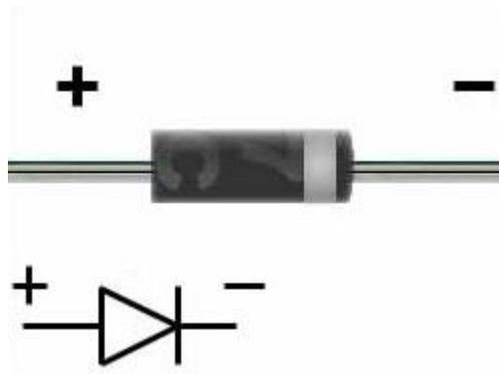
2.3.6.5 Diodo rectificador 1N4005

En el diseño se incluye un diodo rectificador (figura 2.26), cuya función es controlar la polaridad de las entradas provenientes de las fuentes de alimentación para que la corriente eléctrica

solo llegue a los componentes al conectar correctamente los cables de alimentación de la fuente eléctrica. Si el positivo de la fuente está conectado al ánodo del diodo, conduce, y si el negativo de la fuente está conectado al ánodo, no conduce.



(a)



(b)

Figura 2.26. Diodo 1N4005: (a) Conexión de diodo a tarjeta de aislamiento, (b) Esquemático del diodo con sus polaridades.

2.3.6.6 Esquemático de conexiones de las tarjetas de aislamiento y elementos de medición

En el diagrama de la figura 2.27 se muestra el esquema eléctrico de dos etapas, de las conexiones de los dispositivos utilizados en el desarrollo del sistema de acondicionamiento de señales, en el que se puede observar la configuración de los componentes mencionados en apartados anteriores:

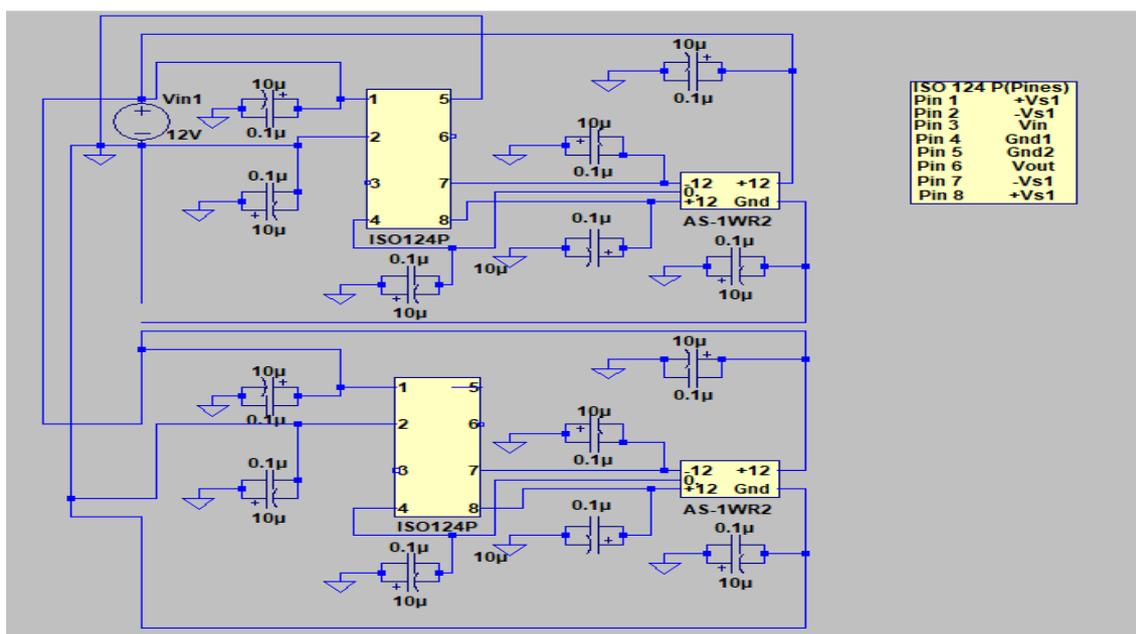


Figura 2.27. Circuito eléctrico esquemático de dos secciones del sistema de acondicionamiento de señal.

En primera instancia, se tiene una fuente de alimentación DC dual $\pm 12V$, conformada por dos fuentes de alimentación EP Freak 603 en conexión simétrica (figura 2.28). Estas fuentes de poder alimentan, tanto al sensor de corriente, como a la placa de aislamiento. Por otro lado, los sensores de temperatura LM-35 fueron alimentados con 5V, tomados de las salidas que permiten 500mA de la fuente de alimentación. Para poder controlar el encendido de cada uno de los elementos, se colocó un montaje de tres interruptores, los cuales controlaban los ventiladores de enfriamiento, el encendido y apagado de las placas pcb's, la alimentación de sensores LM-35 y la alimentación del sensor de corriente.

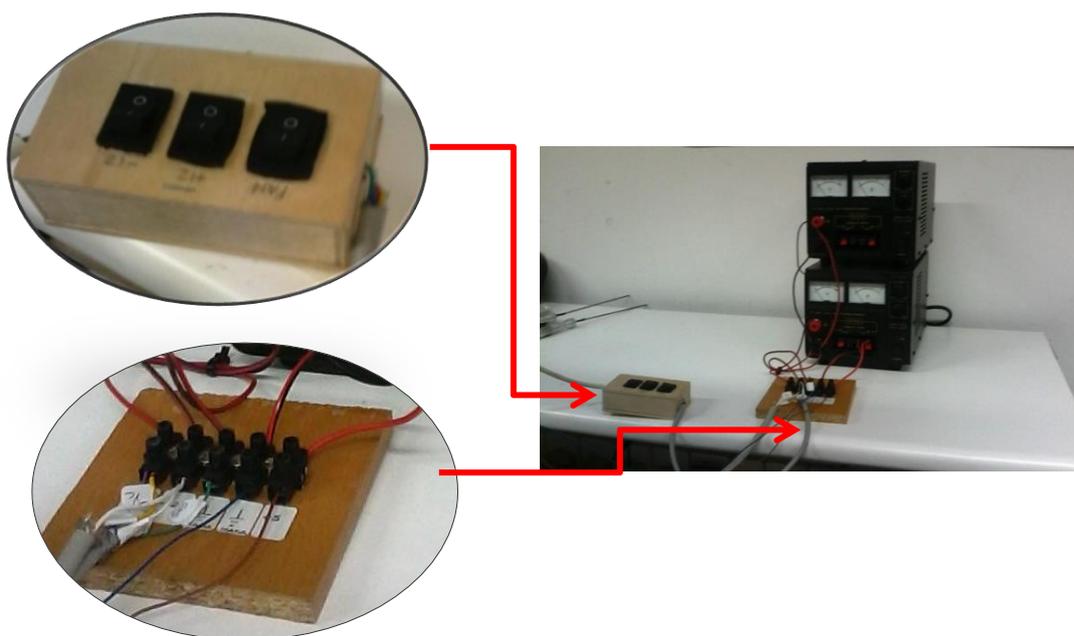


Figura 2.28. Configuración de conexiones de sensores a las fuentes de alimentación.

En la placa de aislamiento se colocaron dos pines para las entradas DC $\pm 12V$ duales, de ambas tarjetas, las mismas fueron interconectadas en ambas placas. Cada configuración de aislamiento (ISO 124P y convertidor) está dotada de sus respectivos pines de entrada y salida. Las entradas corresponden a las señales de común y positivo de cada una de las celdas de la pila de combustible. Las salidas de cada ISO 124P fueron conectadas a las entradas analógicas del NI-USB 6225, siguiendo la configuración de la figura 2.29. Es importante destacar que todas las masas de ambas tarjetas fueron conectadas a la tierra de el módulo NI-USB 6225.



Figura 2.29. Conexión de placas de aislamiento de masas a las salidas de los divisores de tensión y a las entradas analógicas del DAQ NI-USB-6225.

Para evitar el sobrecalentamiento de los ISO's 124P y de los convertidores, fue necesario construir un sistema de enfriamiento, utilizando para ello placas de metacrilato, una estructura de madera y tres ventiladores. La estructura fue abatible, dispuesta así para tener fácil acceso a revisiones durante las operaciones del sistema de adquisición. Esta configuración se muestra en la figura 2.30:

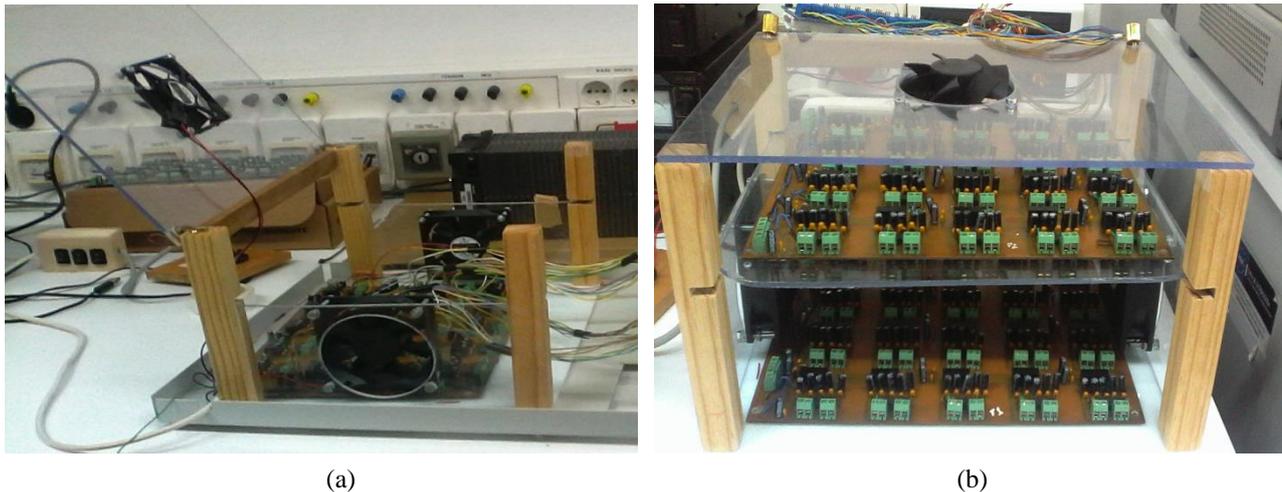


Figura 2.30. Sistema de enfriamiento (a) Sistema de ventilación abatible para intercambio de calor, (b) Montaje de placas en estructura.

2.4 Programas de monitorización

Para llevar a cabo los ensayos fue necesaria la utilización de dos softwares de monitorización que permitieron tener acceso en tiempo real a cada una de las variables en estudio. A continuación, se presenta una breve descripción de ambos programas.

2.4.1 Nexa OEM

El software Nexa OEM es el programa que viene integrado al módulo de la pila y controla diecisiete parámetros, entre los cuales están la temperatura de la pila, el voltaje de la pila, la corriente de la pila, la presión del combustible, el porcentaje de la fuga de combustible, el consumo de combustible, la concentración de oxígeno en el aire, la temperatura ambiente. Asimismo, permite obtener gráficos que muestran el progreso de dichas variables, como se observa en la figura 2.31:

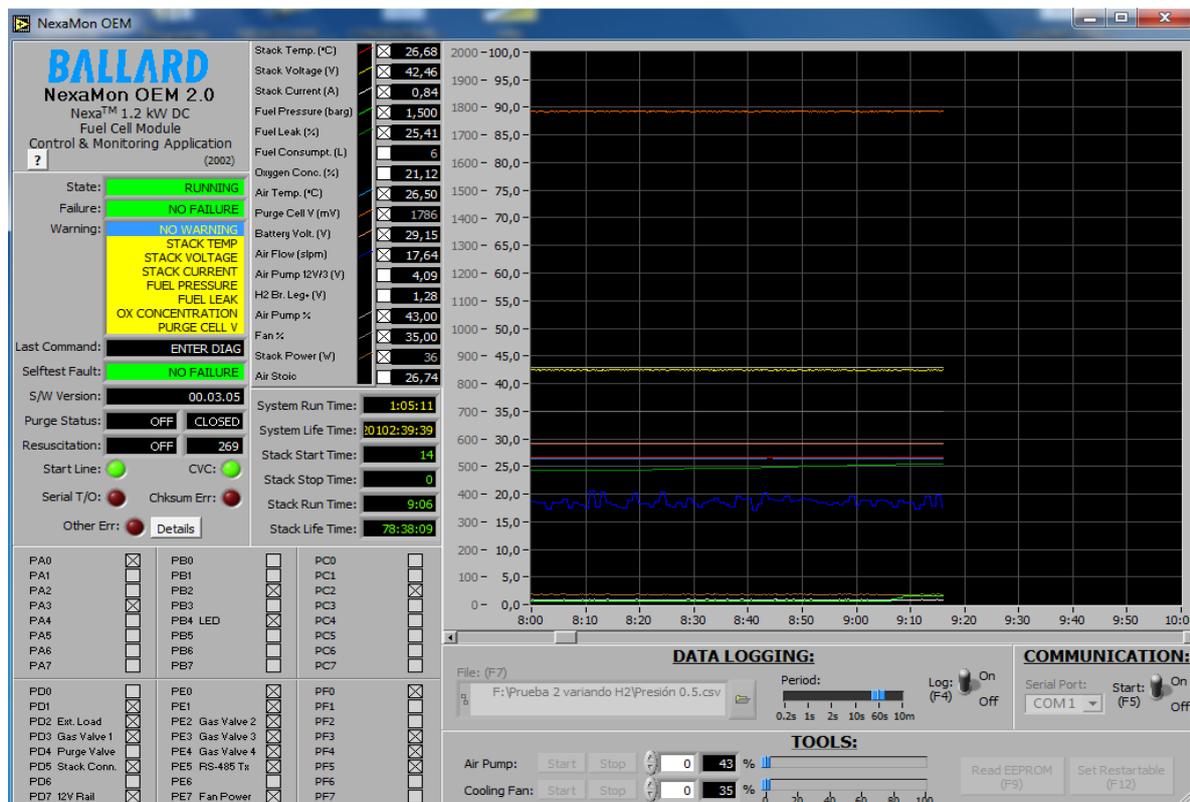


Figura 2.31. Pantalla principal del software NEXA OEM para observación de progreso de las distintas variables de la pila.

En el presente trabajo se tomaron estos datos de referencia para verificar la correcta operación del módulo, en el proceso de pruebas. Un aspecto importante de utilizar este software Nexa OEM, es que además de mostrar parámetros que intervienen en el proceso de generación de energía, muestra los diferentes estados tanto en el proceso de encendido, funcionamiento normal y apagado, por medio de advertencias de error y fallos mostrados en la pantalla del software.

2.4.2 Programa de monitorización en LabView

En la presente tesis se trabajó con la integración de un ordenador, tarjetas de adquisición de datos y el software LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 2015, lo cual constituye un sistema de instrumentación virtual que permitió la visualización, el almacenamiento y el procesado de datos obtenidos de la pila de combustible Nexa. A continuación, se explica brevemente la integración del software y su funcionamiento.

2.4.2.1 Software desarrollado en LabView

Para la monitorización de las variables, se desarrolla una interface virtual utilizando programación grafica o lenguaje G de última generación (LabView) que proporciona la accesibilidad para poder realizar modificaciones a la programación en caso de que el sistema así lo requiera.

En el programa se utilizaron diferentes funciones accesibles del programa Labview con el objetivo de obtener una rutina de adquisición del patrón productor/consumidor en el que dos ciclos While se ejecutan independientemente: el primero es el responsable de la producción de datos y el segundo del procesamiento, como se muestra en la figura 2.32:

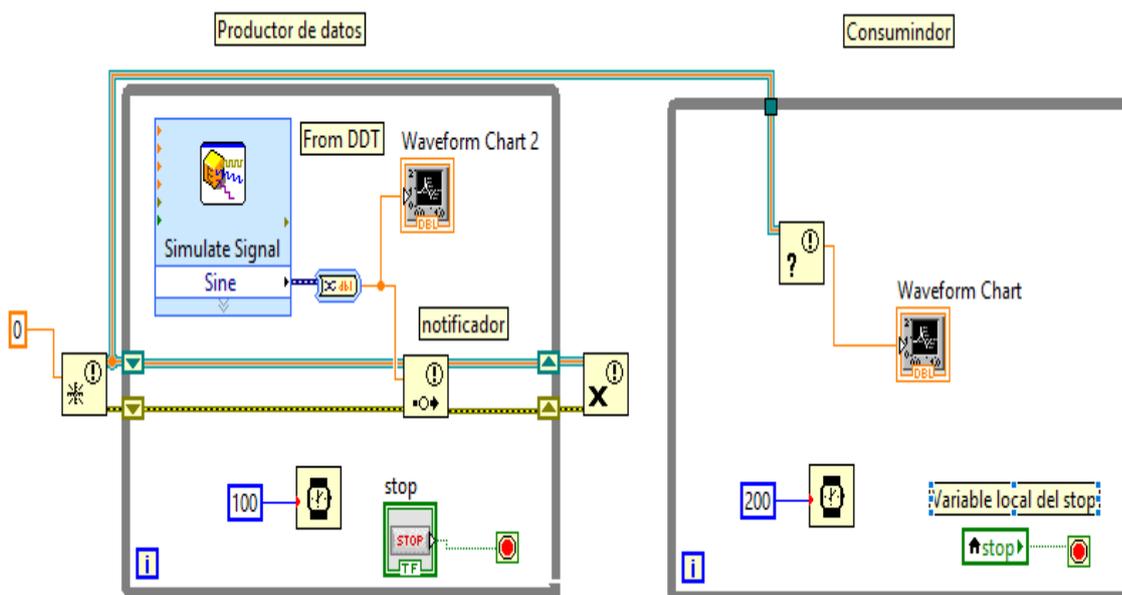


Figura 2.32. Configuración utilizada para la programación del software de monitorización (productor/consumidor).

El programa tiene una configuración de tres productores que adquieren las distintas señales de voltajes, corriente, presión y temperaturas para ser enviados a una configuración de consumidor

y así, ser representados en la interface de usuario por medio de graficos y tablas, como se observa en la figura 2.33:

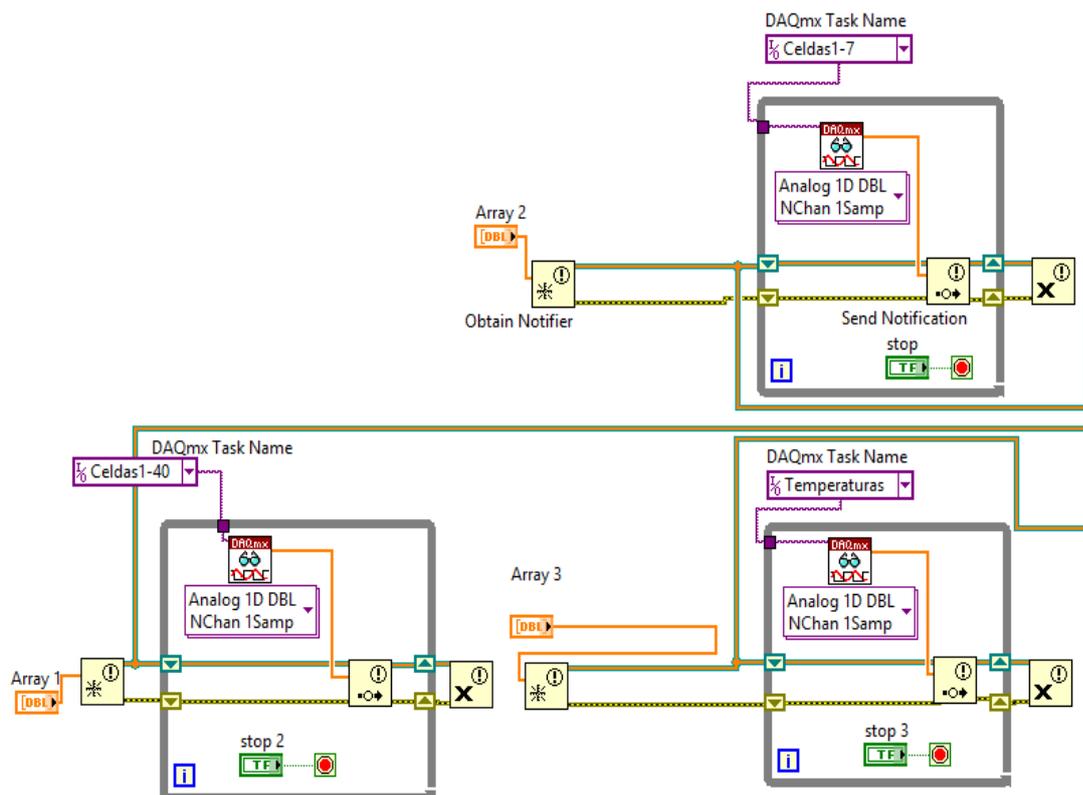


Figura 2.33. Configuración de Productores para las entradas de cada uno de los DAQ del sistema de mediciones.

La programación desarrollada permitió controlar la operación de los dispositivos DAQ (NI-USB (6225,6212 y 6008)) para visualizar y almacenar datos de las medidas de los distintos parámetros generados por la pila PEM. Se utiliza la interfaz USB para la conexión física con el ordenador en donde se ejecuta el programa y en donde son representados los datos de manera gráfica y numérica.

Por otro lado, se hizo necesaria la construcción de una interfaz gráfica de usuario que constituye un elemento importante en el desarrollo del programa, ya que permite tener acceso de manera visual a todas las variables y controles de nuestro sistema en estudio.

Esta interfaz de usuario se muestra en la figura 2.34 e incluye un control del tiempo de muestreo, barras verticales que son indicadores de las temperaturas de las celdas del stack y sus correspondientes campos numéricos. Se incluye, además, un indicador de la presión de hidrógeno que entra a la pila y la corriente generada por el sistema. El usuario puede seleccionar el tiempo de muestreo, voltaje de celda, corriente y temperaturas para representar en el gráfico.

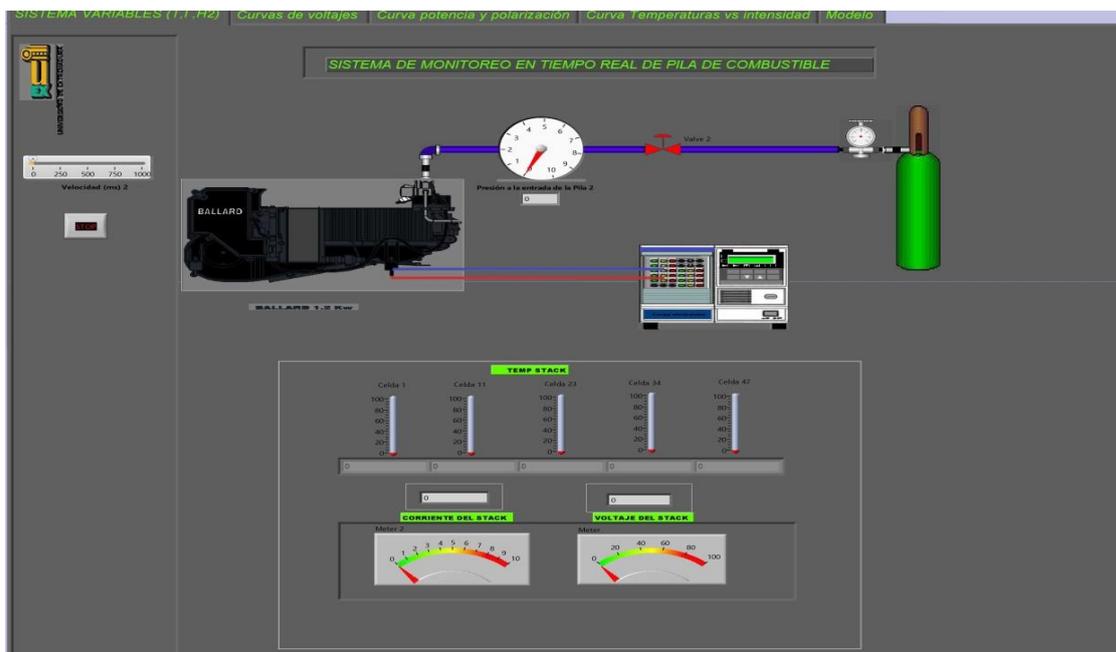


Figura 2.34. Interface de Usuario para el seguimiento de las temperaturas, corriente y presión del H₂ del stack.

Además de lo anterior, se incluye en el panel de usuario o panel frontal, indicadores numéricos de los niveles de tensión, corriente y temperatura del stack, como se muestra en la figura 2.35:



Figura 2.35. Interface de Usuario para el seguimiento de las temperaturas, corriente y presión del H₂ del stack.

En el panel de usuario mostrado en la figura 2.36, se muestra cada uno de los niveles de voltajes por cada celda de la pila de combustible Nexa 1.2kW, además de un gráfico de barras en el

que se diferencian claramente las distribuciones de voltajes a lo largo del stack:

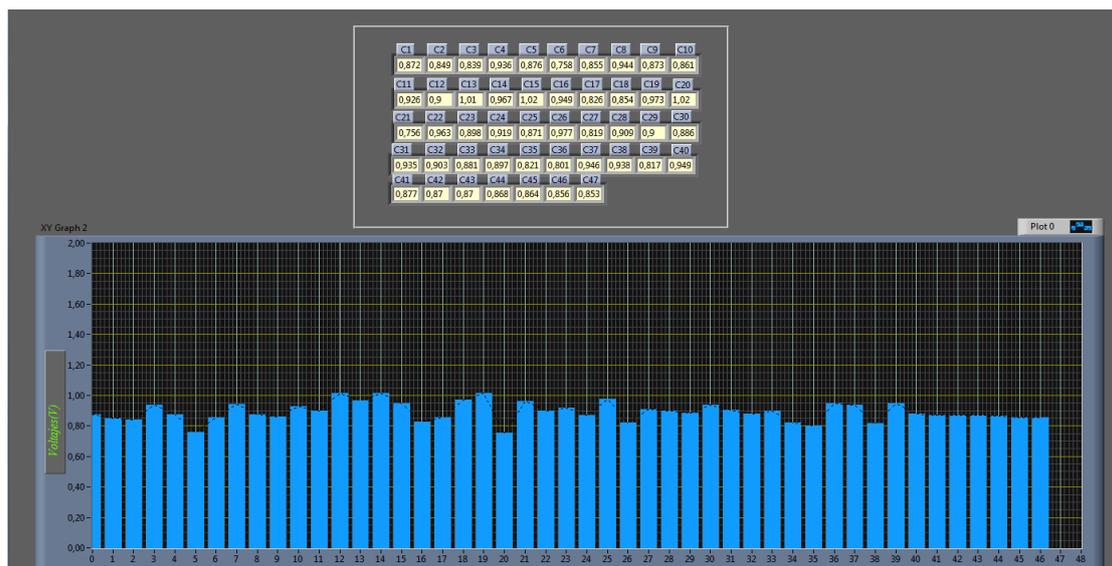


Figura 2.36. Interface de Usuario para el seguimiento del voltaje generado por cada una de las 47 celdas del stack.

Para facilitar la detección de la celda con mayor y menor tensión, se incluyeron indicadores que ubican las celdas que muestran el voltaje máximo y mínimo en el instante de la toma de datos, como se observa en la figura 2.37. Con estos indicadores se hace mucho más rápida la detección de una mala operación en alguna de las celdas y permite detectar la celda con mayor eficiencia:



Figura 2.37. Indicadores de niveles de voltaje máximo y mínimo instantáneo en celdas.

La figura 2.38 muestra el diagrama de bloques final en donde se incluyen los instrumentos virtuales para cada operación y el ciclo productor, consumidor que permitió la toma de medidas de los parámetros contemplados en el sistema de adquisición de datos.

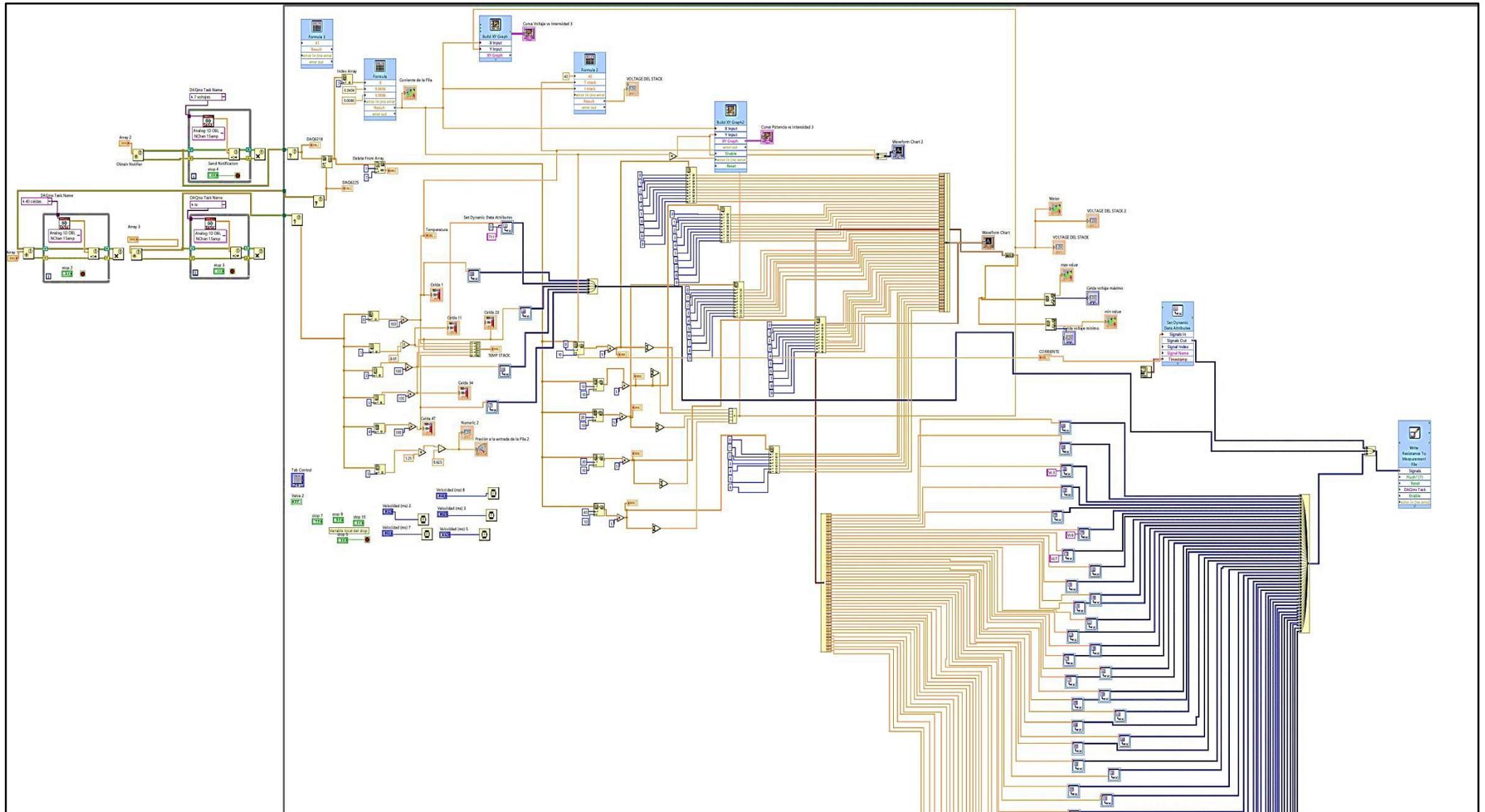


Figura 2.38. Diagrama de bloques control de presión de hidrógeno y adquisición de voltajes, corriente, temperaturas y presión del sistema Ballard Nexa- Pila 1.2kW.

2.5 Funcionamiento general del sistema de adquisición de datos

El funcionamiento general del sistema de adquisición de datos está condicionado al arranque del sistema de control Heliocentris sobre el cual está montada la pila de combustible Nexa 1.2kW. Por lo cual, en este apartado además de explicar el funcionamiento general del prototipo, se aclara el procedimiento de arranque del sistema de control de la pila de combustible.

2.5.1 Sistema heliocentris

La pila de combustible Ballard Nexa que se ha utilizado en este proyecto se encuentra montada en un módulo de integración que incluye las baterías para el arranque del sistema Nexa, visualización y control de los procesos por medio de un ordenador; salida para corriente continua y alterna; y una entrada para el depósito de almacenamiento de hidrógeno. Además, cuenta con botoneras de arranque y parada de la pila, como se muestra en la figura 2.39:

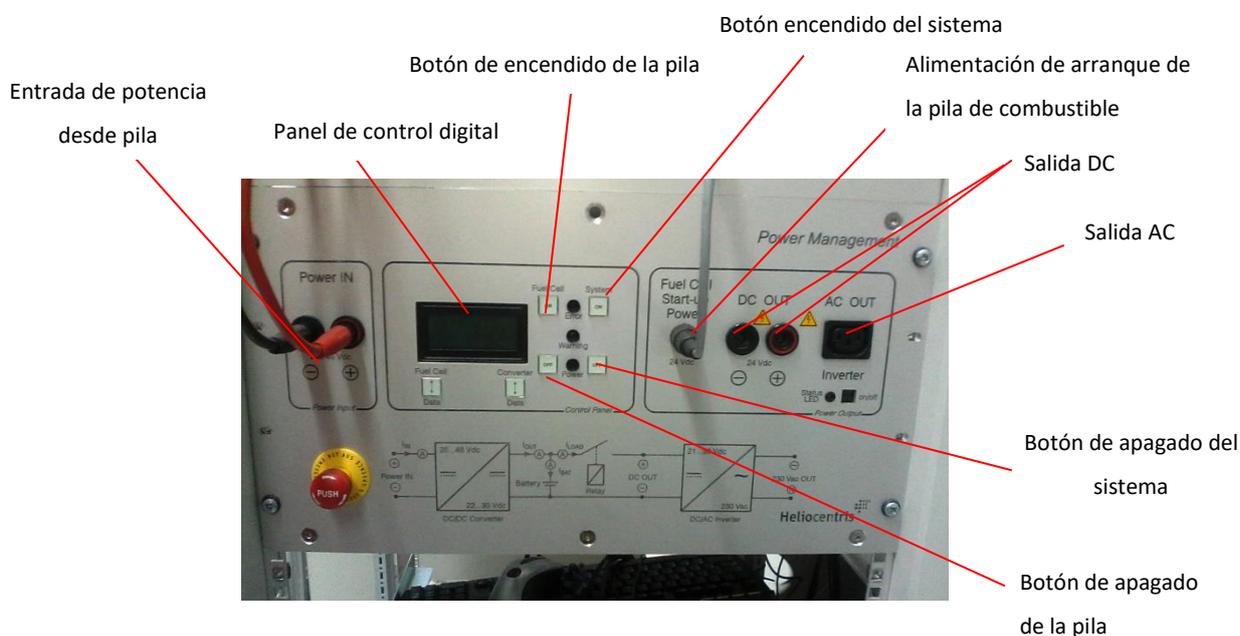


Figura 2.39. Partes que conforman el módulo de administración de potencia Heliocentris.

El sistema heliocentris (figura 2.40), es un sistema en el cual se pueden integrar módulos, entre los cuales están disponibles los que incluyen convertidores DC/DC, que convierten la salida DC no regulada de la pila de combustible a una tensión regulada de 24V. Además, incluye un módulo inversor que genera 230V de corriente alterna a partir de los 24V de salida del convertidor, ofreciendo una potencia total de 1200W. Un relé interno provee la activación y desactivación independiente de la salida AC o DC.

Los módulos anteriormente mencionados se pueden eliminar en caso de no requerir su uso. Es así que en este proyecto no se trabajó con convertidores DC/DC, ni inversores de salida, solamente con el módulo habilitado para la operación de la pila de combustible y la integración de una carga externa, por lo cual, la salida de voltaje era una salida DC no regulada.



Figura 2.40. Vista frontal del sistema integrado Heliocentris utilizado en la realización de ensayos.

2.5.2 Sistema de adquisición de datos multicanal

La figura 2.41 muestra el diagrama de bloques del Sistema de Adquisición de datos, conformado por sensores, módulos divisores de tensión y tarjeta procesamiento de señales que incluye amplificadores de aislamiento y convertidores DC-DC.

El último bloque lo conforman las tarjetas de adquisición de datos que digitalizan las señales provenientes de los dispositivos anteriormente mencionados y las envían al ordenador donde se ha desarrollado la programación del software que permite monitorizar todas las señales por medio de un panel de usuario.

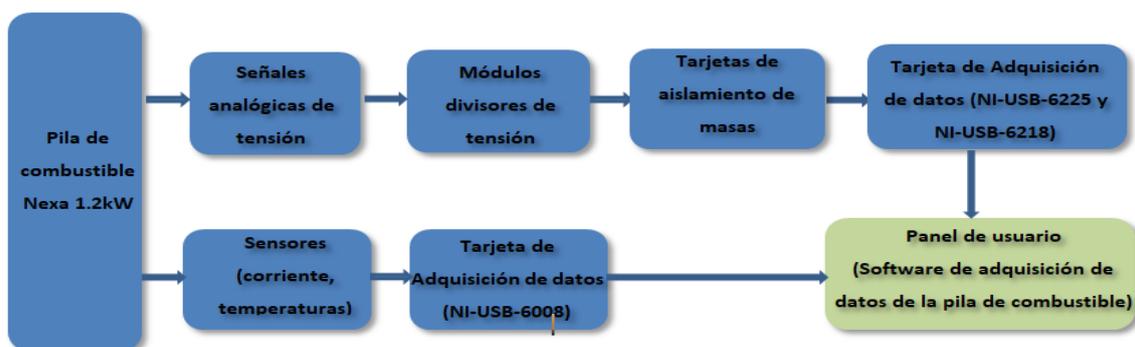


Figura 2.41. Estructura por bloques del sistema de adquisición de datos desarrollado.

El proceso a seguir para el funcionamiento del sistema de adquisición de datos comienza con el arranque de los dos ordenadores tanto del sistema heliocentris y del sistema de adquisición de datos, para poder ejecutar los programas Nexa OEM y el programa de monitorización desarrollado en LabView y de esta manera queden habilitados para los ensayos. Posteriormente, se activan los interruptores que controlan la alimentación de las tarjetas de aislamiento de masas y de los sensores, para luego alimentar la pila de combustible ajustando la presión de la bombona de hidrógeno al nivel de presión de la prueba y proceder con el arranque de la pila por medio del botón de ON del sistema heliocentris. Durante este proceso, el sistema tarda unos 5 minutos para el arranque completo de la pila para luego permanecer en estado de operación normal.

Mediante el panel de usuario en Labview se pueden visualizar los diferentes parámetros de temperatura en celdas, voltajes en cada una de las celdas que componen el stack, voltaje del stack, corriente de la pila. Los diferentes niveles de tensión son mostrados en una representación gráfica de barras en donde se puede distinguir claramente el valor máximo y mínimo instantáneo por medio de indicadores numéricos, como se muestra en la figura 2.42:



Figura 2.42. Paneles de usuario de sistema de monitorización desarrollado y del sistema heliocentris.

En el panel de usuario del sistema de monitorización se puede ajustar la velocidad de muestreo por medio de una barra de desplazamiento, entre velocidades de 0 a 1000 milisegundos. Además de ello, se ha incluido en la programación, un modelo matemático que toma datos instantáneos de los sensores de corriente y temperatura del stack para obtener, de forma teórica, el voltaje de la pila y así poder realizar una comparativa con el valor real obtenido mediante sensores.

Este modelo corresponde a un modelo matemático semi-empírico en el que Torreglosa &

Miraoui (2009) proponen, con la ayuda del método de regresión lineal, y experimentando con una pila idéntica a la utilizada en este proyecto (Ballard NExa 1.2kW). Con este modelo se definen los distintos valores de sus parámetros por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{fc}: E - b \ln(i) - R_{ohm} \cdot i - m \exp(ni) \quad (2.2)$$

$b \ln(i)$ se define como la pérdida de activación, $m \exp(ni)$ representa las pérdidas de concentración, m , y n dependen de forma lineal con la temperatura del stack:

$$V = b_1 \cdot T_{st} + b_2;$$

$$R_{ohm} = R_1 \cdot T_{st} + R_2;$$

$$m = m_1 \cdot T_{st} + m_2;$$

$$n = n_1 \cdot T_{st} + n_2;$$

Con esta ecuación se hace necesario conocer dos entradas del sistema, que son la corriente del stack y la temperatura del stack, medidas por el sistema de monitorización. En el panel de usuario se anexó una representación comparativa del voltaje del stack, obtenido mediante el sistema de monitorización y el voltaje calculado a través de la ecuación anteriormente descrita, como se muestra en la figura 2.43:

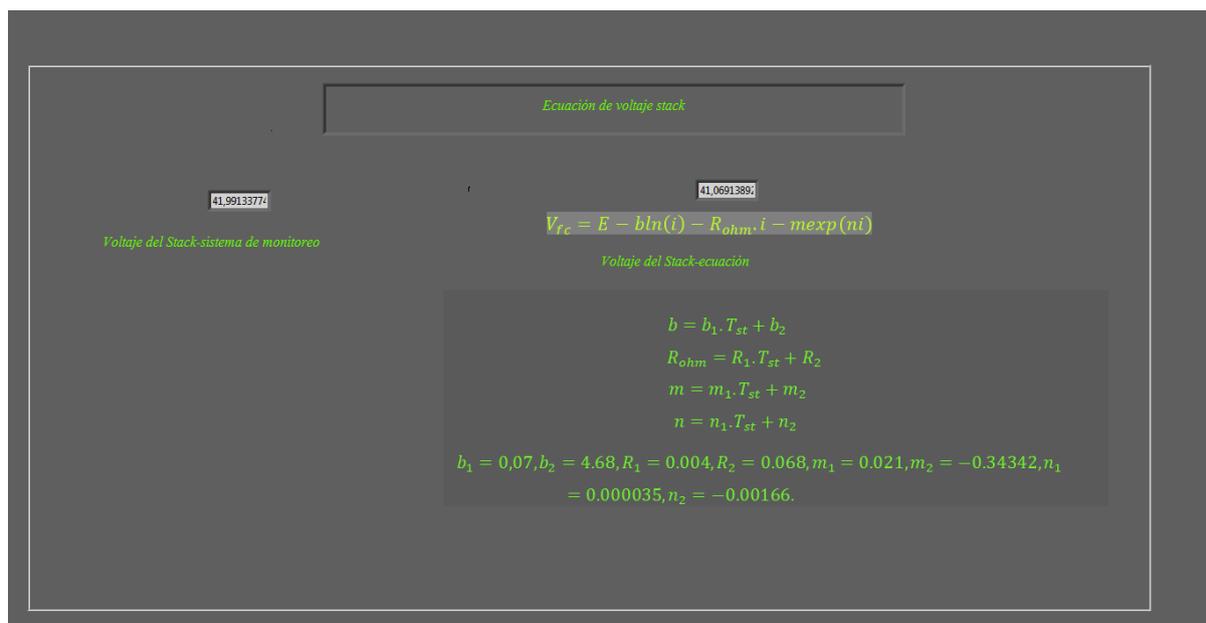


Figura 2.43. Representación en panel de usuario de voltaje del stack de nuestro prototipo y el obtenido mediante ecuación matemática.

2.6 Ensayos con el Sistema de Monitorización multicanal

2.6.1 Instalación Experimental

Para realizar el trabajo de tesis fue necesario disponer de un laboratorio compuesto de los siguientes equipos: tanque de almacenamiento de hidrógeno, pila de combustible Ballard Nexa PEM de 1200W que, como se mencionó, es un módulo integrado de 47 celdas de combustibles conectadas en serie y de componentes auxiliares como el compresor de aire, la turbina de refrigeración, el humidificador, la válvula de purgado, el regulador de presión y el control mediante microprocesador. Por otro lado, se dispuso de dos ordenadores, dos fuentes de alimentación, multímetro de precisión y una bombona de hidrógeno. Este equipamiento fue facilitado por el laboratorio del grupo GAIRBER de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura. El sistema heliocentris fue contratado al Centro Nacional de Hidrógeno. Todo el equipamiento se muestra en la figura 2.44:

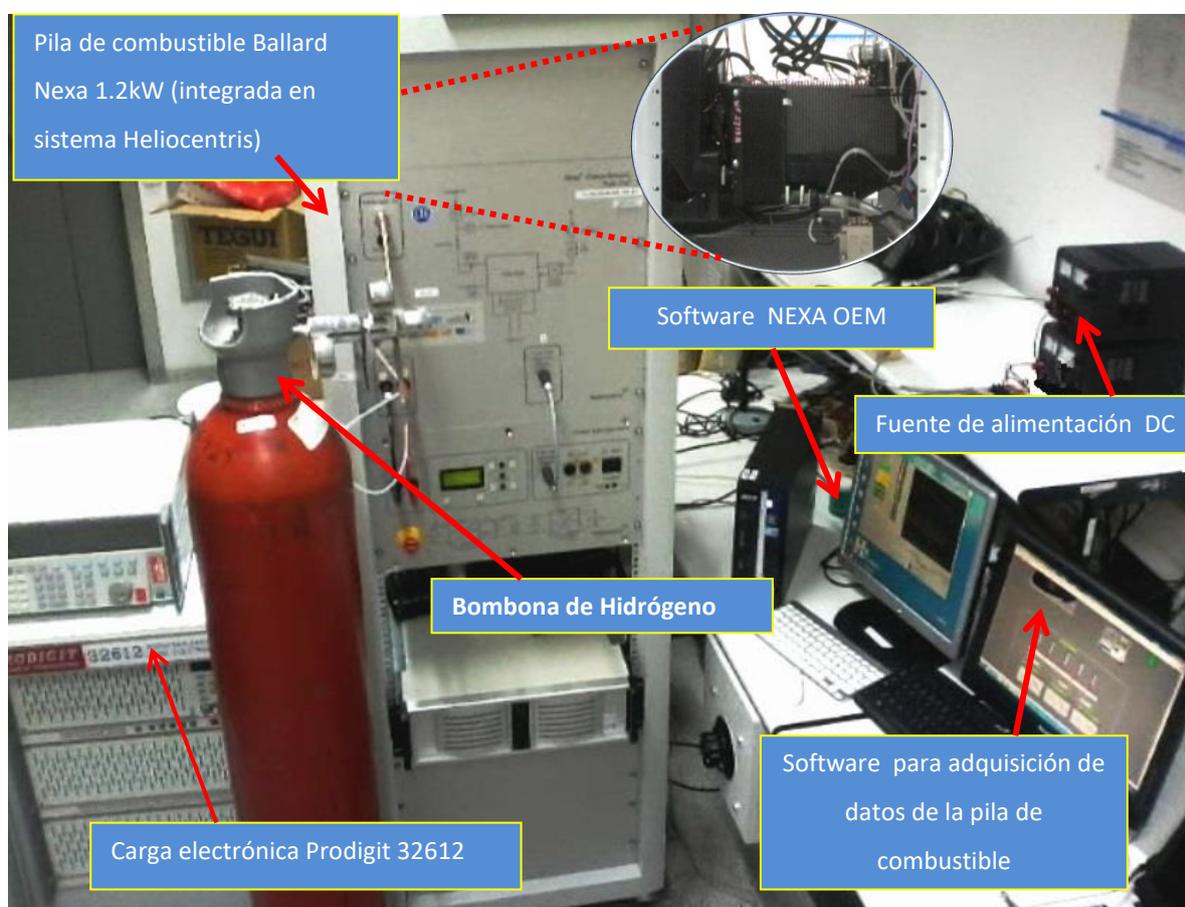


Figura 2.44. Equipamiento de pruebas para ensayos con el sistema de monitorización en tiempo real de la pila de combustible PEM 1.2kW.

Para la adquisición de variables fue necesario el software desarrollado en labview. Para las medidas de corriente y temperaturas se utilizó un sensor de efecto hall HTB 100-TP y sensores LM35 respectivamente. Las señales analógicas provenientes de estos sensores, junto a las de voltajes provenientes de cada una de las 47 celdas, se conectan a los módulos de adquisición de datos DAQ USB-6218, USB-6225 y USB-6009. Se empleó el software Ballard OEM para verificar los parámetros de funcionamiento del stack: potencia generada, presión de hidrógeno, temperatura de la pila, fugas de hidrógeno, concentración de oxígeno, entre otras.

2.6.2 Carga electrónica Serie 3260

Para simular una carga real se utilizó una carga electrónica programable modelo Prodigit serie 3260. Esta puede ser usada para trabajar con interfaces GPIB/RS-232C o con el panel manual de operaciones. El área de trabajo es de 1200W a un voltaje entre 0 y 300 V y una corriente entre 0 y 12 A, como se muestra en la figura 2.45:

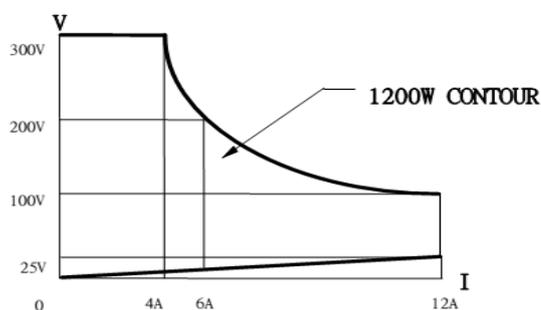


Figura 2.45. Área de trabajo de la carga electrónica Prodigit 3260.

Esta carga electrónica tiene cuatro modos distintos de control:

- Modo CC: La corriente de carga es independiente de la tensión de entrada.
- Modo C.C lineal: permite establecer la intensidad en el circuito, dependiendo la tensión del elemento generador.
- Control de Resistencia de Carga (CR): la entrada de corriente de carga depende del ajuste de la resistencia.

El modo de operación utilizado corresponde al modo CC. De esta forma se pudo ajustar la corriente de carga al valor correspondiente a cada una de las pruebas y obtener la respuesta de la pila ante dicha carga.

Para la conexión de la carga activa al sistema heliocentris se utilizaron terminales eléctricos de cobre para realizar el ajuste de los bornes positivo y negativo a los conectores existentes en el sistema de control, como se muestra en la figura 2.46:

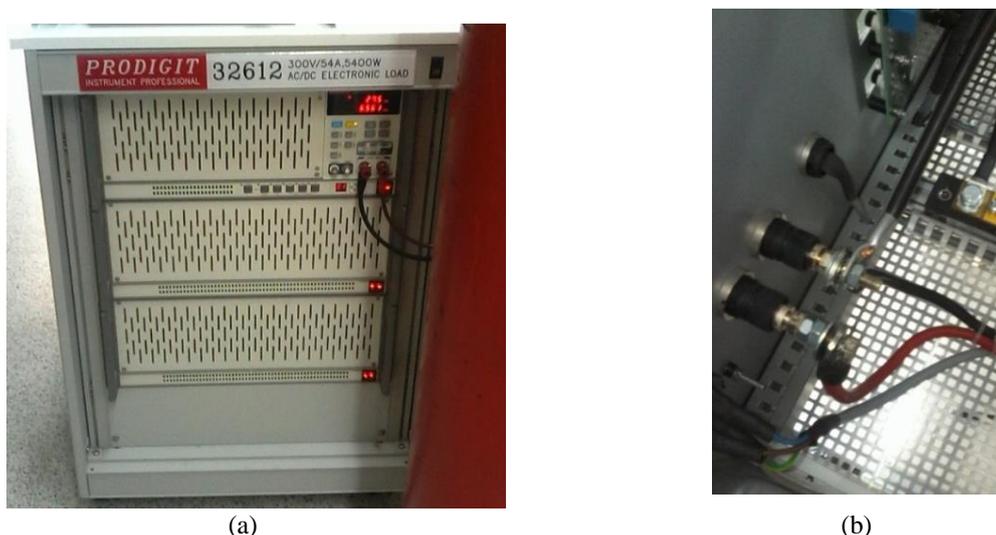


Figura 2.46. Conexión de sistema de carga: a) Carga electrónica Prodigit 32612, (b) Conexión de carga electrónica a sistema de control heliocéntrico.

2.6.3 Características estacionarias y transitorias de Pila de Combustible PEM del CNH (Centro Nacional de Hidrógeno)

Cuando existe una variación en el flujo de corriente en los terminales de la celda causado por alguna perturbación, se genera un cambio o variación de la corriente en un instante de tiempo, esta característica se denomina operación en **regimen transitorio** y por lo general el estudio de este estado se representa con un gráfico del voltaje de la celda en función del tiempo. En el **régimen estacionario**, la pila de combustible opera con una carga externa constante en un periodo de tiempo determinado.

En este apartado se presentan los diferentes procedimientos a seguir para evaluar nuestro sistema en los dos regímenes de operación anteriormente mencionados y verificar la respuesta de la pila en estos modos de trabajo, utilizando los parámetros mostrados en la figura 2.47:

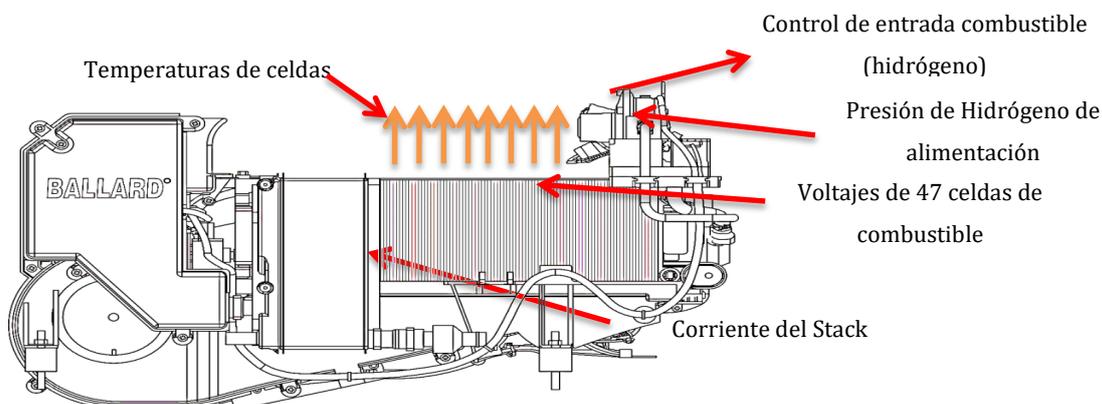


Figura 2.47. Esquema de parámetros de medición en el stack de la pila de combustible.

2.6.3.1 Operación estática

A continuación, se detallan los diferentes ensayos realizados para evaluar la pila de combustible Nexa Ballard 1.2Kw utilizando el sistema de monitorización en tiempo real desarrollado.

2.6.3.1.1 Relación entre la corriente de carga de la pila y la temperatura de operación del stack.

Para evaluar la variación de corriente de carga en el comportamiento de la temperatura de la pila o stack, se realizan ensayos utilizando distintas intensidades para la carga externa, en este caso un rango ente 2.5 y 10 A a escalones de 2.5 amperios.

Los ensayos se realizaron a una presión de hidrógeno (entrada del regulador de presión de H₂) de 2.5 bares, enfriando el stack con el ventilador del sistema. Se utilizaron la carga electrónica prodigit 3260, multímetro de precisión, sensores de temperatura LM35 (colocados a la salida superior de aire de refrigeración de la pila), fuente EP-603 y sensor de temperatura ambiente davis instrument. El procedimiento fue el siguiente:

- Se inicializó el software OEM para verificar las condiciones iniciales de operación del sistema (temperatura ambiente, presión de H₂, presión O₂).
- Se inicializó el software del sistema de monitorización para el almacenamiento de los datos.
- Se ajustó la entrada de la bombona de hidrógeno a 2.5 bar.
- Se aplicó una corriente de carga de 2.5 A para un tiempo de 7 minutos y se comprobó el cambio de la temperatura del stack.
- Con la pila en condiciones iniciales de operación (después de enfriar el stack) se aplicó una carga de 5A por 7 minutos y se comprobó el cambio de la temperatura del stack.
- Con la pila en condiciones iniciales de operación, se aplicó una carga de 7.5 amperios por un tiempo de 7 minutos y se verificó la temperatura del stack (la pila no se operó a la corriente máxima para evitar problemas de polarizaciones de concentración y transferencia de masa que pueden reducir la vida útil del módulo).
- Se realizó el procedimiento anterior para un carga de 10 amperios.
- Se desarrollaron gráficas del comportamiento de la temperatura del stack a variaciones en la corriente de carga aplicada (gráficos comparativos).

2.6.3.1.2 *Ensayos para definir la curva de polarización.*

Las curvas de polarización representan el comportamiento de la celda en régimen estacionario. Es decir, cuando la demanda de corriente que realiza una carga externa permanece constante a lo largo del tiempo.

En este proyecto se trabajó con un sistema automatizado que ajusta la temperatura a medida que varía la carga en sus terminales, por lo cual, para verificar la curva de polarización o su característica estática, se aplica la carga externa en periodos cortos de tiempo para evitar variaciones excesivas de temperatura.

La temperatura de funcionamiento a la potencia máxima (46 A) de la pila es de 65°C. A esta corriente existen pérdidas por la velocidad de consumo de los reactantes al llegar al electrodo (pérdidas de concentración), por lo cual, se trabajará a una temperatura menor 65°C:

- Se ajustó la presión de entrada de hidrógeno a 2.5 bares.
- Se inicializaron los programas NEXA OEM y el programa desarrollado.
- Se verificaron las condiciones iniciales de operación (temperatura ambiente, presión de H₂, presión O₂).
- Se arrancó el controlador heliocentris y a su vez la pila de combustible.
- Se estabilizó el sistema a una temperatura de stack constante.
- Se ajustó la carga externa a 1.5 A y se verificó el cambio en el voltaje del stack.
- Se repitió el procedimiento con cargas de 2.5 A, 3.9A, 5.2A, 6.3A, 7.6A, 8.6A y 9.8 A, intentando que los cambios entre cargas tuvieran un periodo corto de tiempo.
- Se desconectó la carga electrónica y se presionó el botón de apagado del sistema heliocentris.
- Se verificó que la válvula de entrada de hidrógeno estuviera en estado cerrado.

2.6.3.1.3 *Distribución del voltaje a lo largo del stack.*

Para estudiar el comportamiento del voltaje de cada una de las celdas a lo largo del stack, se realizan ensayos de operación con carga externa y sin carga, para lo cual se ajustó la presión de hidrógeno (entrada del regulador de presión de H₂) en 2.5 bares.

El procedimiento para llevar a cabo las pruebas con carga externa fue el siguiente:

- Se ajustó la presión de entrada de hidrógeno a 2.5 bares.
- Se utilizó el software OEM para verificar las condiciones iniciales de operación del sistema (temperatura ambiente, presión de H₂, presión O₂) y el software del sistema de monitorización para el almacenamiento de los datos.
- Se arrancó el controlador heliocentris para activar la pila de combustible.

- Se estabilizó el sistema a una temperatura de stack constante.
- Se ajustó la carga electrónica externa prodigit a una intensidad de 5 A.
- Se estabilizó el sistema a temperatura de stack constante.
- Se aplicó una carga de 10 A y estabilizó la temperatura comprobando la variación de la misma por medio del software desarrollado.
- Se ajustó el control de presión de hidrógeno a cero bares.
- Se desenergizó el módulo de control heliocentris.
- Se verificó que la válvula de entrada de hidrógeno estuviera en estado cerrado.

El procedimiento para llevar a cabo las pruebas sin carga externa fue el siguiente:

- Se ajustó la presión de entrada de hidrógeno a 2.5 bares.
- Se utilizó el software OEM para verificar las condiciones iniciales de operación del sistema (temperatura ambiente, presión de H₂, presión O₂) y el software del sistema de monitorización para el almacenamiento de los datos.
- Se arrancó la pila hasta el estado estable (temperatura del stack constante).
- Se realizaron mediciones de cada una de las celdas (47) por un periodo de 10 minutos.
- Se apagó el módulo helioncentris.
- Se verificó que la válvula de entrada de hidrógeno estuviera en estado cerrado.

Con ambas pruebas se pudieron realizar comparaciones entre los promedios de voltajes para el stack aplicando carga externa y en circuito abierto. De esta manera, se verificó el comportamiento o distribución para ambos estados de operación, como se explica en el siguiente apartado de resultados y discusión.

2.6.3.2 Operación dinámica

2.6.3.2.1 Respuesta transitoria bajo diferentes condiciones de carga a escala constante.

Los ensayos en estado transitorio a escala constante, van dirigidos a investigar la dinámica o el comportamiento del stack a diferentes pulsos de corriente en intervalo fijo. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se ajustó la presión de entrada de hidrógeno a 2.5 bares.
- Se utilizó el software OEM para verificar las condiciones iniciales de operación del sistema (temperatura ambiente, presión de H₂, presión O₂) y el software del sistema de monitorización para

el almacenamiento de los datos.

- Se arrancó el controlador heliocentris de la pila de combustible.
- Se estabilizó el sistema a una temperatura de stack constante.
- Se ajustó la carga electrónica externa prodigit, a una intensidad de 1.5 A y se aplicó en un

tiempo de 40 segundos.

- Se desconectó la carga externa y se esperó 123 segundos.
- Se aplicó una corriente de carga de 3 A en 40 segundos.
- Al alcanzar los 40 segundos, se desconectó la carga externa.
- Se realizaron los pasos anteriores, para corrientes de carga de 4.5 A, 6 A, 7.5 A, 9 A, y

10.5 A.

- Se desconectó la carga externa y se esperó que la temperatura del stack se estabilizara, para luego apagar el sistema heliocentris.

- Se verificó que la válvula de entrada de hidrógeno estuviera en estado cerrado.

2.6.3.2.2 *Respuesta transitoria bajo diferentes condiciones de cargas a escala variable.*

En este apartado se puntualizan los procedimientos de los ensayos para verificar la respuesta transitoria del voltaje y temperaturas del stack en escalas de intensidad variables. Estos se muestran a continuación:

- Se ajustó la presión de entrada de hidrógeno a 2.5 bares.
- Se utilizó el software OEM para verificar las condiciones iniciales de operación del sistema (temperatura ambiente, presión de H₂, presión O₂) y el software del sistema de monitorización para el almacenamiento de los datos.

el almacenamiento de los datos.

- Se arrancó el controlador heliocentris y la pila de combustible.
- Se estabilizó el sistema a una temperatura de stack constante.
- Se ajustó la carga externa a 1.5 A y se esperó a que la temperatura de stack se

estabilizara.

- Se repitió el procedimiento con cargas de 2.5 A, 3.9 A, 5.2 A, 6.3 A, 7.6 A, 8.6 A y 9.8 A.
- Se apagó el sistema de control heliocentris y se cerró la válvula de ingreso de hidrógeno.

2.6.4 Características estacionarias de Pila de Combustible PEM de la UEX

Para realizar una evaluación comparativa de nuestro sistema de monitorización multicanal con otro sistema de mediciones por etapas, se utilizó otra pila de combustible idéntica a la operada para los ensayos explicados en el apartado anterior. Estas mediciones fueron realizadas utilizando un

DAQ NI-USB 6218, que es capaz de medir hasta 8 canales en modo diferencial. En cada ensayo se podían medir solo 8 celdas, por lo que las medidas se obtuvieron por partes, en un total de 6 ciclos de medidas para obtener el voltaje individual de las 47 celdas.

Para la realización del proyecto fue necesario disponer de un laboratorio compuesto de los siguientes equipos: tanque de almacenamiento de hidrógeno, pila de combustible del Ballard Nexa PEM de 1200W, un ordenador, dos fuentes de alimentación, multímetro de precisión y bomba de hidrógeno, como se observa en la configuración de la figura 2.48:



Figura 2.48. Configuración de equipos para ensayos con pila de combustible Ballard Nexa de UEX.

2.6.4.1 Ensayos en modo estático con carga y sin carga externa

Como se mencionó anteriormente, para realizar las mediciones de los voltajes en las 47 celdas fue necesario fraccionar las pruebas en 6 partes, por lo que se conectaron las celdas en secciones de 8 para poder completar el número total de celdas del stack, tal como se muestra en la figura 2.49.

Uno de los inconvenientes de realizar mediciones por partes es que las temperaturas de trabajo pueden no ser las mismas para cada una de las pruebas, interfiriendo en las medidas. Tomando esto en cuenta, las medidas fueron tomadas después de estabilizar la temperatura a un valor inicial, para cada uno de los ciclos y en periodos cortos de tiempo.

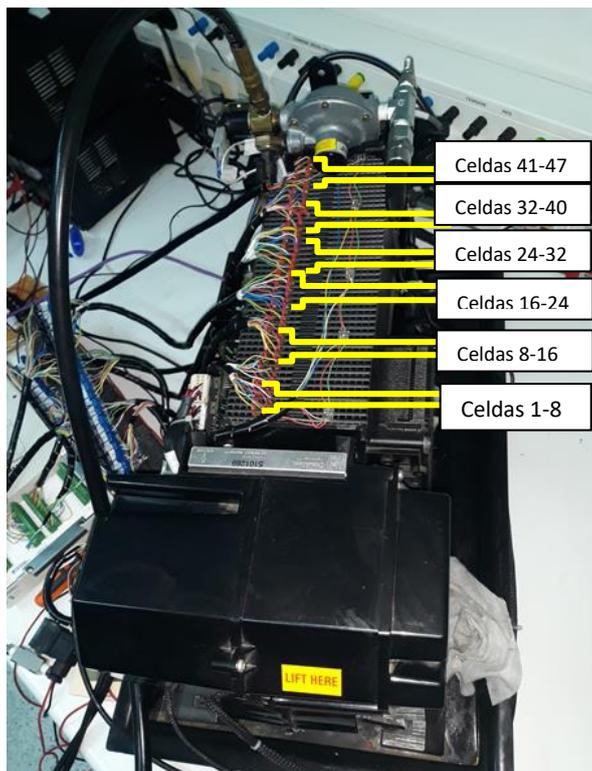


Figura 2.49. Configuración de medidas por secciones de 8 celdas en pila de combustible perteneciente a la UEX.

El procedimiento para el experimento fue el siguiente:

- Se colocaron los 8 conectores correspondientes a las celdas del 1 al 8.
- Se arrancó la fuente de alimentación que suministra 24V continuos al sistema de pila de combustible.
- Se dio apertura a la válvula de control de presión del hidrógeno para el suministro de combustible a una presión de 3.5 bares y se procedió al encendido de la pila.
- Se estableció el punto de operación de la pila y se verificaron los parámetros iniciales: temperatura, voltaje y corriente de la pila, presión del combustible, fuga de combustible, concentración de oxígeno, voltaje de purga en las celdas y advertencias de voltajes.
- Se inicializó el programa de medidas previamente elaborado el LabView para el seguimiento y captura de los datos de voltajes generados por cada una de las 47 celdas.
- Se arrancó la pila de combustible por medio del interruptor habilitado para tal propósito y se realizó la monitorización de voltajes por un tiempo de 1 minuto.
- Se esperó que la temperatura del stack se estabilizara para repetir el procedimiento para los 5 ciclos restantes.
- Se repitió el procedimiento utilizando una carga externa ajustada a 2.7 amperios.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados experimentales

Todos los ensayos, cuyos resultados se muestran en este capítulo, se realizaron utilizando la arquitectura descrita en el apartado metodología. En primera instancia, se realiza una breve descripción de las configuraciones de descarga de datos utilizando el programa desarrollado, para dar continuidad con los resultados obtenidos de las diferentes pruebas y una discusión de los mismos.

3.2 Almacenamiento de datos

Dentro de la programación se incluye la generación de una hoja de cálculo donde se almacenan las variables:

- Temperaturas en celdas
- Tensión en celdas
- Tensión del stack
- Intensidad del stack
- Temperatura del stack
- Tensión del stack generado por ecuación matemática (explicado en el capítulo 2)

Por otro lado, la herramienta Nexa OEM, permitió dar seguimiento a los parámetros que intervienen en el funcionamiento de la pila de hidrogeno como lo son:

- Porcentaje de fuga de combustible (H_2)
- Consumo de hidrógeno
- Concentración de oxígeno en el aire
- Tensión de purga
- Presión de hidrogeno
- Estatus de purga
- Estatus de operación de arranque
- Estatus de operación de parada

Los datos son almacenados cada minuto en el ordenador habilitado para las pruebas y por cada ensayo se solicita al usuario crear un nombre específico que sirva de referencia para la prueba en cuestión. El formato del archivo descargado es el formato de hoja de cálculo .xlsx, al cual se tiene acceso por medio de la herramienta Microsoft Excel de Office (figura 3.1).

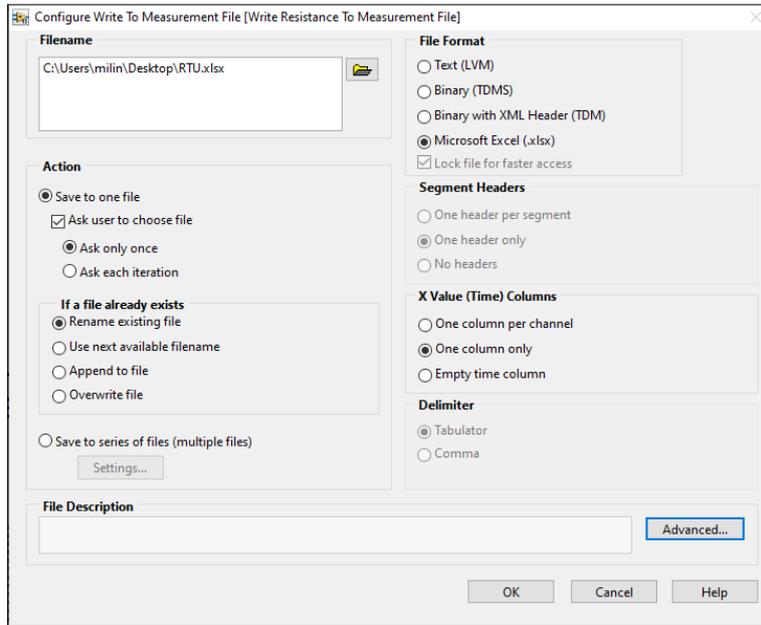


Figura 3.1. Configuración de nombres, formato, encabezado y columnas de tiempo.

La tabla generada por cada ensayo fue configurada por cabeceras. Las cabeceras corresponden con las variables a medir e incluyen el tiempo y fecha en formato mes/día/año hora: minutos: segundos, como se muestra en la figura 3.2.

The image shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data structure:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Tiempo	Corriente del Stack	Voltaje modelo	Temperatura Stack	Voltaje Stack	T1	T11	T23	T34	T47	Vc1	Vc2	Vc3	Vc4	Vc5
2	10/31/2019 16:00:45.371	0.41721	44.197525	26.972969	46.324179	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.982546	1.081623	0.972559	1.044493	0.9961
3	10/31/2019 16:00:45.580	0.41721	44.197525	26.972969	45.729347	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.995535	1.052597	0.875023	1.070134	1.0359
4	10/31/2019 16:00:45.880	0.41721	44.198327	27.176599	46.221953	25.92847	27.125472	27.815583	25.953797	28.042001	1.018403	1.004602	0.954411	1.070134	1.0426
5	10/31/2019 16:00:46.052	0.151663	47.130746	26.972969	45.713671	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.975095	1.079366	0.934486	1.042647	1.0322
6	10/31/2019 16:00:46.387	0.41721	44.197525	26.972969	46.224086	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.970481	1.081623	0.93951	1.070134	1.0345
7	10/31/2019 16:00:46.571	0.41721	44.197525	26.972969	46.329495	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.97906	1.067981	0.907454	1.070134	1.0223
8	10/31/2019 16:00:46.857	0.151663	47.138025	27.176504	46.345274	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.984905	1.081623	0.994776	1.037211	1.0548
9	10/31/2019 16:00:47.073	0.41721	44.197525	26.972969	46.022778	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.981726	0.98693	0.982095	1.027673	1.0541
10	10/31/2019 16:00:47.378	0.151663	47.130746	26.972969	45.499225	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	1.01249	0.98464	0.937459	1.050988	1.0143
11	10/31/2019 16:00:47.604	0.41721	44.197525	26.972969	45.62113	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.948846	1.081623	0.994571	1.001864	1.0518
12	10/31/2019 16:00:47.901	0.41721	44.198327	27.176617	46.034973	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	28.042001	0.936678	1.038957	0.901746	1.060048	1.0447
13	10/31/2019 16:00:48.105	0.41721	44.196723	26.769417	45.922958	25.92847	27.125472	27.815583	25.953797	27.023763	0.981316	1.071537	0.950754	1.067946	0.9966
14	10/31/2019 16:00:48.418	0.151663	47.123465	26.769417	46.065467	25.92847	27.125472	27.815583	25.953797	27.023763	0.997518	1.081623	0.984932	1.070134	1.0254
15	10/31/2019 16:00:48.616	0.41721	44.197525	26.972952	45.90147	25.92847	27.125472	27.815583	25.953797	27.023763	0.989451	1.081623	0.978643	1.010044	0.9373
16	10/31/2019 16:00:48.925	0.151663	47.123465	26.769417	45.614023	25.92847	27.125472	27.815583	25.953797	27.023763	0.961594	1.038102	0.978028	1.055535	1.0234
17	10/31/2019 16:00:49.124	0.151663	47.138025	27.176504	45.915821	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.968806	0.962081	0.911965	0.99137	1.0237
18	10/31/2019 16:00:49.430	0.151663	47.130746	26.972969	45.931899	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.942967	1.037111	0.96005	1.054168	0.9983
19	10/31/2019 16:00:49.671	0.151663	47.130746	26.972969	45.576104	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.977317	1.037863	0.957726	1.022819	0.9778
20	10/31/2019 16:00:49.966	0.41721	44.197525	26.972969	45.822119	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	1.066604	1.068699	0.975191	1.070134	1.0442
21	10/31/2019 16:00:50.180	0.41721	44.197525	26.972969	45.774969	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.985794	1.055879	0.950241	0.990105	1.0175
22	10/31/2019 16:00:50.472	0.151663	47.130746	26.972969	46.046747	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.960261	1.056939	1.01484	1.070134	1.0679
23	10/31/2019 16:00:50.679	0.151663	47.145309	27.380151	45.806782	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	28.042001	1.030197	1.062785	0.978951	1.037621	1.0105
24	10/31/2019 16:00:50.991	0.41721	44.198327	27.176617	45.53576	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	28.042001	0.992562	1.022241	0.915245	1.017281	0.9880
25	10/31/2019 16:00:51.214	0.151663	47.130746	26.972969	45.899269	25.92847	27.125472	27.815583	26.971557	27.023763	0.994578	1.05164	0.908069	1.070134	1.0534

Figura 3.2. Formato de tabla generada en Excel para almacenar los datos generados en los ensayos.

3.3 Exposición y discusión de resultados

En este apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos de los diferentes ensayos utilizando el sistema de adquisición multicanal desarrollado.

Los estudios pueden dividirse en dos grupos principales:

- **Operación estática:** Operando la pila sin carga y con carga fija.
- **Operación dinámica:** aplicando diferentes perturbaciones del sistema (operaciones de arranque, parada, purgas) y variación regular e irregular de carga.

3.3.1 Operación estática

3.3.1.1 Relación entre la corriente de carga de la pila y la temperatura de operación del stack

Para analizar el comportamiento de la temperatura en función de la corriente generada por la pila, se obtuvo la curva representada en la figura 3.3, en la que se observa un aumento proporcional de la temperatura del stack conforme aumenta la intensidad de corriente de la pila. Para una intensidad de 5 A, el tiempo para que se estabilice es de 6.5 minutos, en el caso de 10 A es de 7 minutos, aproximadamente, para 15 amperios es de 8 minutos y en el caso de 20 amperios el tiempo es de aproximadamente 9 minutos.

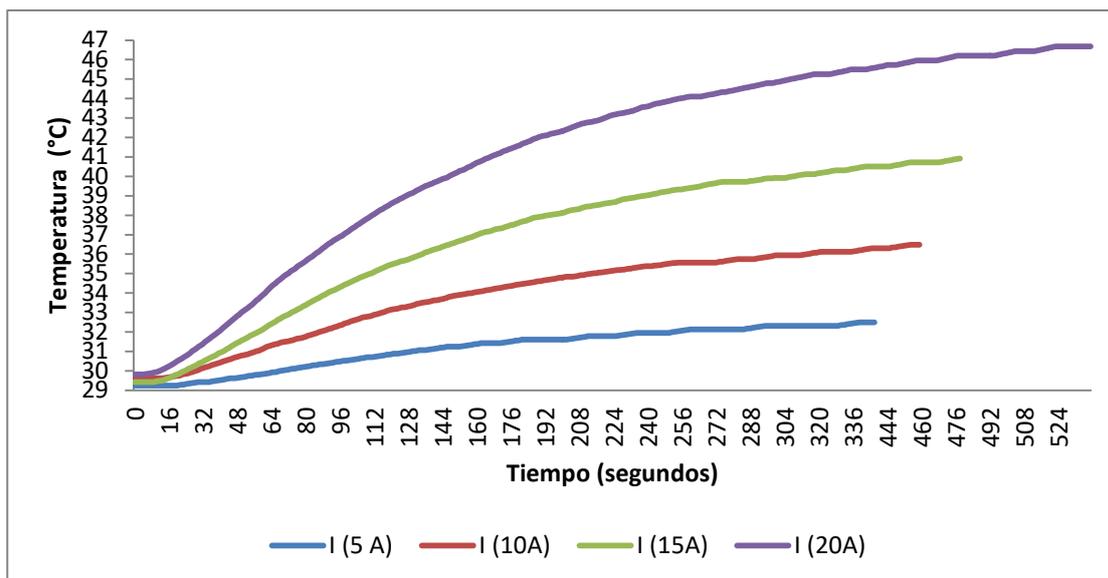


Figura 3.3. Perfiles de temperaturas como función de la corriente del stack.

Este comportamiento, directamente proporcional entre la temperatura y la corriente del stack, está íntimamente relacionado con los incrementos en las reacciones que ocurren a nivel de celdas, ya que al aumentar la potencia entregada se exige mayor consumo de combustibles y existe

un aumento en la velocidad en la que se transfieren iones en las reacciones de óxido reducción para cada una de las 47 celdas. Es importante destacar que a mayor temperatura, se obtiene mejor conductividad protónica para responder a la demanda de corriente.

3.3.1.2 Distribución de temperaturas con/sin carga externa

Las temperaturas a lo largo del stack, en específico en las celdas 1, 11, 23, 34 y 47, muestran un comportamiento proporcional al aumento de corriente de carga, como se muestra en la figura 3.4, manteniendo entre ellas diferencias muy poco significativas.

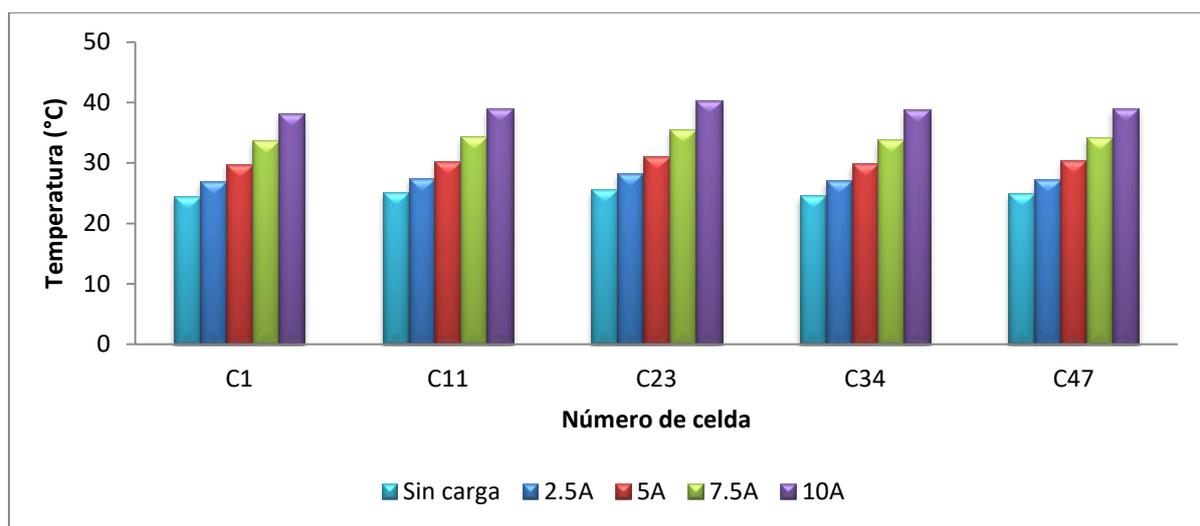


Figura 3.4. Temperaturas en cinco puntos del stack con/sin carga.

Otra vez se pone de manifiesto un aumento de temperatura en proporción directa con la corriente suministrada por la pila. La máxima diferencia de temperaturas entre celdas fue de 1.66 °C (celda 23 y 34) para una carga de 7.5 amperios. En la tabla 3.1 se observan diferencias menores a un grado entre las temperaturas obtenidas de la variación de carga entre celdas 1 y 11 y celdas 34 y 47. Las diferencias de 11 grados son evidentes entre las temperaturas al aumentar la carga aplicada en escalas de 7.5 amperios. Estos aumentos no se dan entre cargas menores, siendo estas diferencias entre 2 y 4 grados (tabla 3.2).

Tabla 3.1.

Diferencias comparativas de temperaturas a lo largo del stack (celdas 1, 11, 23,34 y 47).

I carga	T_{C1} (°C)	T_{C11} (°C)	$T_{C1}-T_{C11}$ (°C)	T_{C23} (°C)	T_{C34} (°C)	$T_{C23}-T_{34}$ (°C)	T_{C47} (°C)	$T_{C34}-T_{C47}$ (°C)
2.5A	26.91	27.41	0.50	28.30	27.06	1.24	27.27	0.22
5A	29.81	30.18	0.36	31.13	29.87	1.26	30.36	0.49
7.5A	33.78	34.34	0.56	35.53	33.87	1.65	34.27	0.40
10A	38.20	38.97	0.77	40.28	38.77	1.51	39.01	0.23

Tabla 3.2.

Diferencias comparativas de temperaturas al aplicar escalones de carga.

I carga	T_{C1} (°C)	T_{C11} (°C)	T_{C23} (°C)	T_{C34} (°C)	T_{C47} (°C)
5-2.5	2.90	2.76	2.83	2.81	3.08
7.5-5	3.96	4.16	4.39	4.00	3.92
10-7.5	4.42	4.63	4.76	4.90	4.74
10A-2.5A	11.29	11.55	11.98	11.72	11.73

3.3.1.3 Uniformidad del voltaje a lo largo del stack sin carga externa y con carga externa

En este punto, se realiza un seguimiento del voltaje generado por cada una de las celdas que componen el stack de la pila de combustible. Este seguimiento permitirá comprobar la distribución de los voltajes en este sistema y observar su comportamiento. Por otro lado realizaremos una comparación de resultados obtenidos utilizando dos tipos de arquitectura de medición para comprobar la validez de nuestro sistema.

3.3.1.3.1 Uniformidad de voltaje sin carga externa

Como se mencionó en el apartado “Metodología”, el módulo Nexa es capaz de proporcionar 1.2kW de potencia nominal y un voltaje de salida sin carga de 43 V y de 26 V a plena carga. Para mantener la temperatura del stack constante, este módulo utiliza un sistema de refrigeración conformado por un sistema de ventiladores que fuerzan la circulación del aire entre las distintas celdas por medio de una serie de canales. El aire frío penetra por la parte baja de la pila y el aire caliente sale por la parte alta.

Los ensayos sin carga externa fueron realizados arrancando el sistema y esperando que la temperatura del stack se estabilizara a un valor constante, las medidas de voltajes en cada una de las

47 celdas se graficaron por un periodo de 57 segundos.

Para los ensayos anteriormente descritos, se obtuvieron voltajes con una media de 855 mV, siendo el valor máximo registrado de 980 mV en la celda 14 y un valor mínimo de 703 mV en la celda 21. En el gráfico de barras de la figura 3.5 se observa claramente el voltaje máximo y mínimo en las celdas 14 y 21 respectivamente:

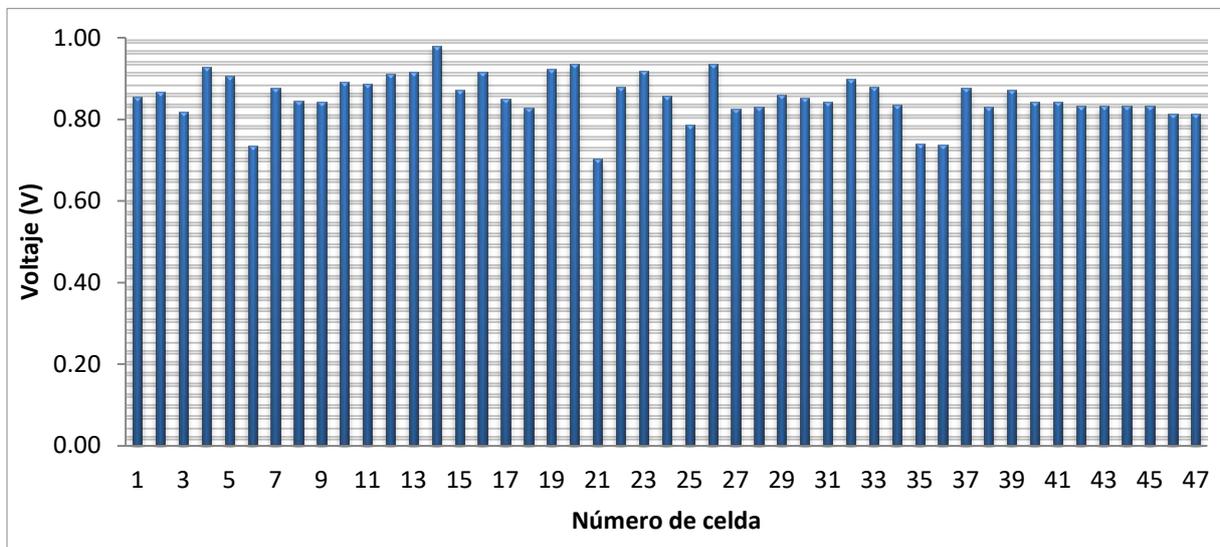


Figura 3.5. Respuesta del voltaje en cada una de las 47 celdas de la pila Ballard Nexa sin carga externa.

Mulder, De Ridder, Coenen, Weyen & Martens (2008) indican que las diferencias en los voltajes de las celdas individuales pueden tener muchas causas: impurezas en la pila, gotas de agua en canales de gas, flujo de gas desigual a través de diferentes celdas, membranas demasiado secas o demasiado húmedas, mal contacto eléctrico, daño o degradación del conjunto de electrodo de membrana (MEA), campos de flujo, etc. Por otro lado, y como se ha explicado en el apartado “Metodología”, en el diseño de la arquitectura del sistema, los amplificadores de aislamiento presentan un error de offset en los voltajes de salida, y en específico, para el amplificador que se ha utilizado ISO 124P. Este valor, según los datos del fabricante, tiene un valor típico $VOS \leq 50\text{mV}$. A su vez, la ganancia para estos dispositivos es de 1; sin embargo, al momento de realizar pruebas con cada uno de los amplificadores de aislamiento utilizados, esta presenta un error de 0,1% aproximadamente.

3.3.1.3.2 Uniformidad de voltaje con carga externa

Al aplicar una corriente de carga de 5 A y al alcanzar una temperatura del stack estable, se obtiene el gráfico de la figura 3.6, en el cual se muestra una media de 725 mV entre los voltajes de

las 47 celdas, siendo el valor máximo 850mV en la celda 14 y el valor mínimo de 572 mV en la celda 21.

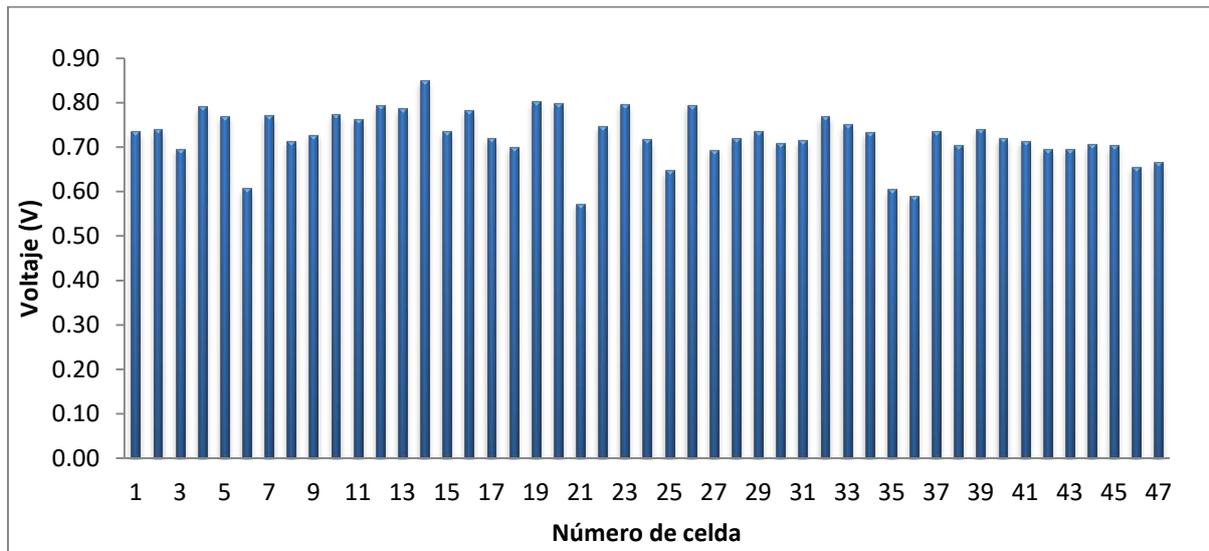


Figura 3.6. Respuesta del voltaje en cada una de las 47 celdas de la pila Ballard Nexa con carga externa de 5 A.

Otra vez se observa un valor máximo y mínimo entre las celdas 14 y 21, respectivamente. En la celda 21 se registra un voltaje menor al de su celda contigua celda 22. De esto se puede inferir problemas de ruido, offset y algún desajuste en el contacto de placas de medición. Sin embargo, siguen una distribución bastante uniforme.

3.3.1.3.3 Comparativa de operación sin/con carga externa

El gráfico comparativo de los voltajes para cada una de las 47 celdas en operación sin carga y con cargas de 5 y 10 A se muestra en la figura 3.7. El voltaje promedio de todas las celdas para la operación sin carga externa es de 856 mV. Al aplicar 5 A de carga, se redujo a 736 mV y fue de 691 mV, aplicando una carga de 10A.

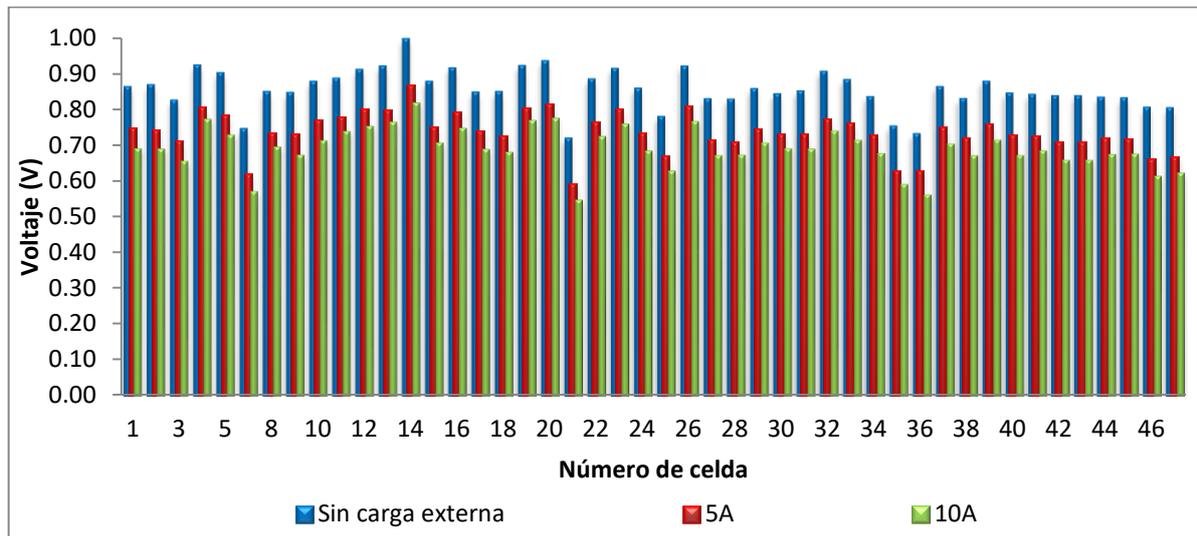


Figura 3.7. Perfiles de voltajes para cada una de las celdas de la pila de combustible Ballard Nexa, sin/con carga externa de 5 A y 10A.

La diferencia de los promedios en operación sin carga y con carga, fue de 120 mV aplicando 5 A y 165 mV con 10 A. A pesar de que los valores máximos y mínimos se obtienen en las celdas 14 y 21, respectivamente, existe una tendencia a obtener una distribución en la que los valores máximos promedios se registran en las celdas que se han medido cercanas a la entrada del regulador de hidrógeno.

En la figura 3.8 se muestra la dispersión de los datos a lo largo del stack, en la que se observan, claramente, tensiones debajo del promedio en las celdas 6, 21, 35 y 36 y tensiones mayores en las celdas 14, 19, 20, 23, 26:

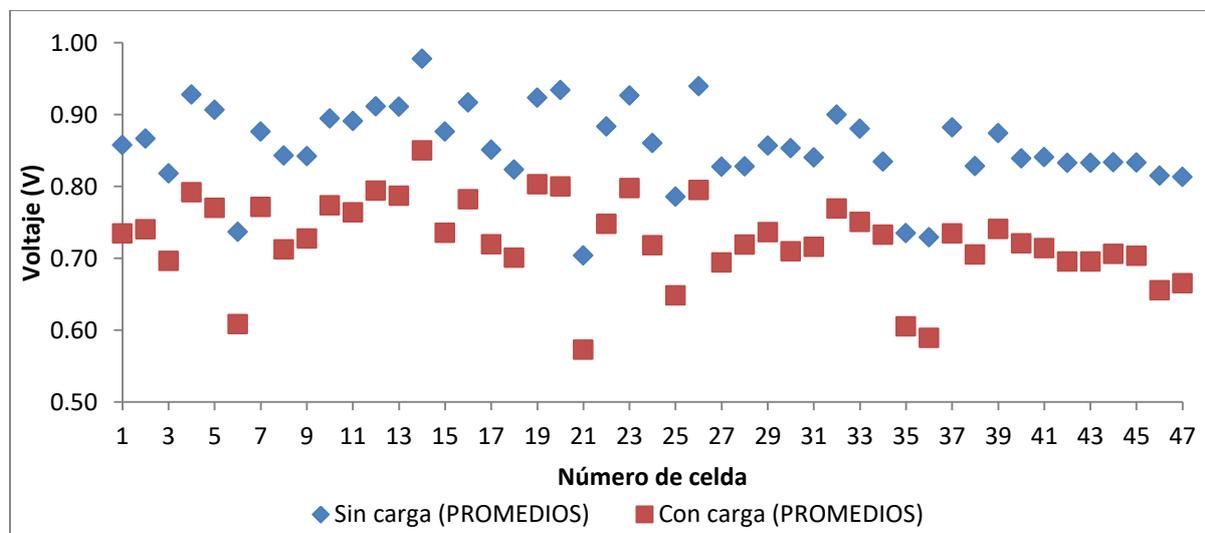


Figura 3.8. Dispersión de voltajes para cada una de las celdas de la pila de combustible Ballard Nexa sin carga y con carga externa de 5 A.

3.3.1.3.4 Comparativa de operación utilizando dos sistemas de medición sin carga externa

Como se ha explicado en el apartado “Metodología”, se trabajó con dos pilas de combustible de la misma marca y modelo Ballard Nexa 1.2kW, con las cuales se realizaron monitorizaciones para efectuar comparaciones entre los comportamientos de los voltajes entre ambos sistemas. En la figura 3.9 se muestra un gráfico que refleja medidas de las 47 celdas para ambos sistemas. En la pila UEX se ha ajustado la presión de la válvula de control de entrada de hidrógeno para diferentes presiones entre 0.5 y 7.5. Por otro lado, para la pila CNH se obtuvieron medidas utilizando una sola presión de 3 bar. Se muestra claramente la tendencia de ambos gráficos, a valores decrecientes, siendo menores en las últimas celdas cercanas al compresor de aire:

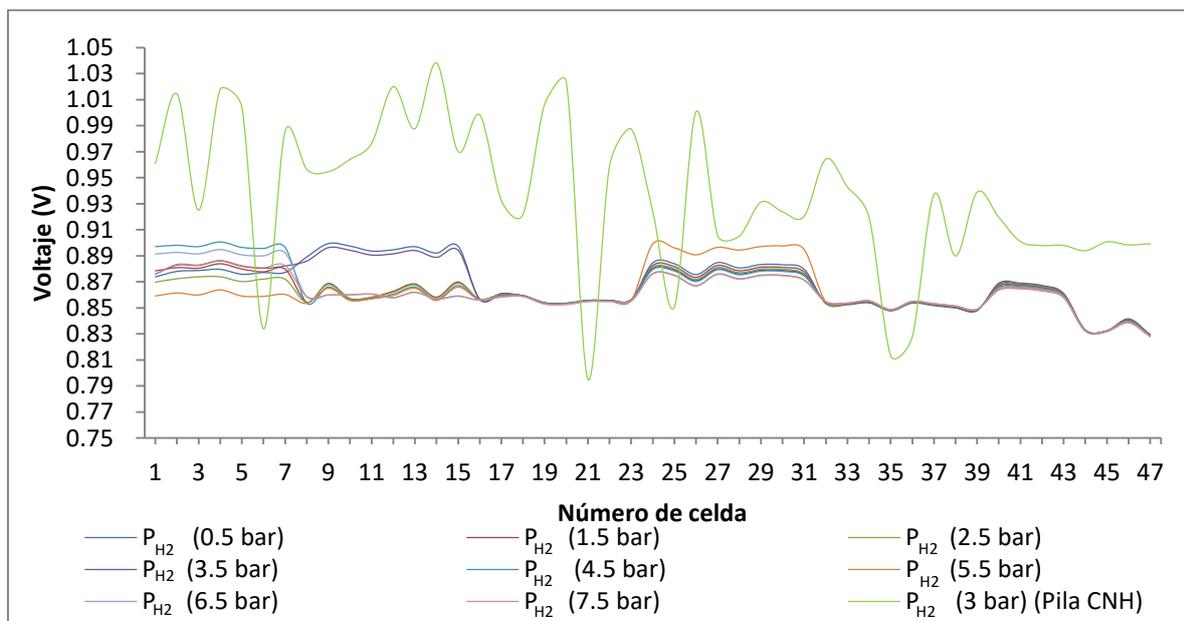


Figura 3.9. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas sin carga externa variando presión de regulador de entrada de H_2 en pila UEX y aplicando 3 bar en pila CNH.

En el sistema de medición de la pila UEX, los ensayos se efectuaron con paradas después de realizar cada una de las medidas para estabilizar el sistema y obtener condiciones iniciales similares en las pruebas. Los parámetros tomados en consideración fueron: temperatura de stack, temperatura ambiente y presión de hidrógeno, los cuales fueron monitorizados por medio del programa Nexa OEM.

Estas pruebas se efectuaron en grupos de 8 celdas, debido a que el sistema DAQ (data adquisición System) que se utilizaba en ese momento solo contaba con 8 entradas analógicas. El total de medidas por grupo fue de 6 para completar el total de 47 celdas que componen el stack. A pesar de este inconveniente, se obtuvo medidas similares (figura 3.10), si se comparan las

mediciones con el segundo sistema utilizado para la pila CNH.

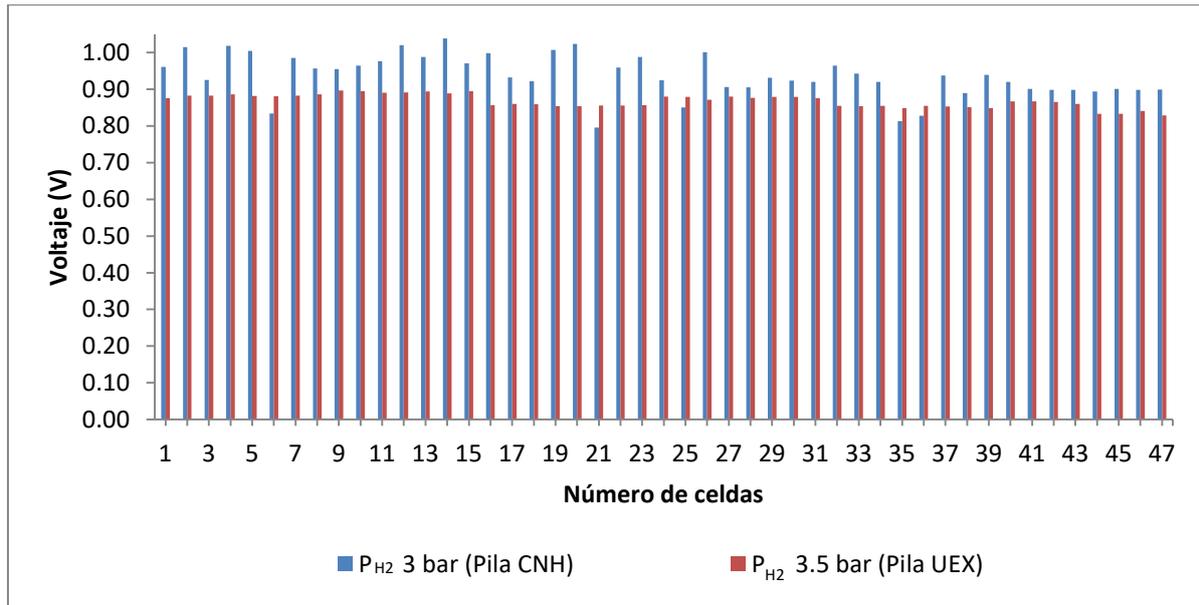


Figura 3.10. Distribución de voltajes en 47 celdas sin aplicar carga externa, utilizando presión de hidrógeno de 3.5 bar en la pila UEX y 3 bar en pila CNH.

Las mediciones para un tiempo total de aproximadamente 1 segundo, se muestran en la figura 3.11. En este gráfico se hace evidente que el valor máximo de voltaje se registra en la celda 4 y es de 886mV. El mínimo corresponde con la celda 47 y es de 829 mV.

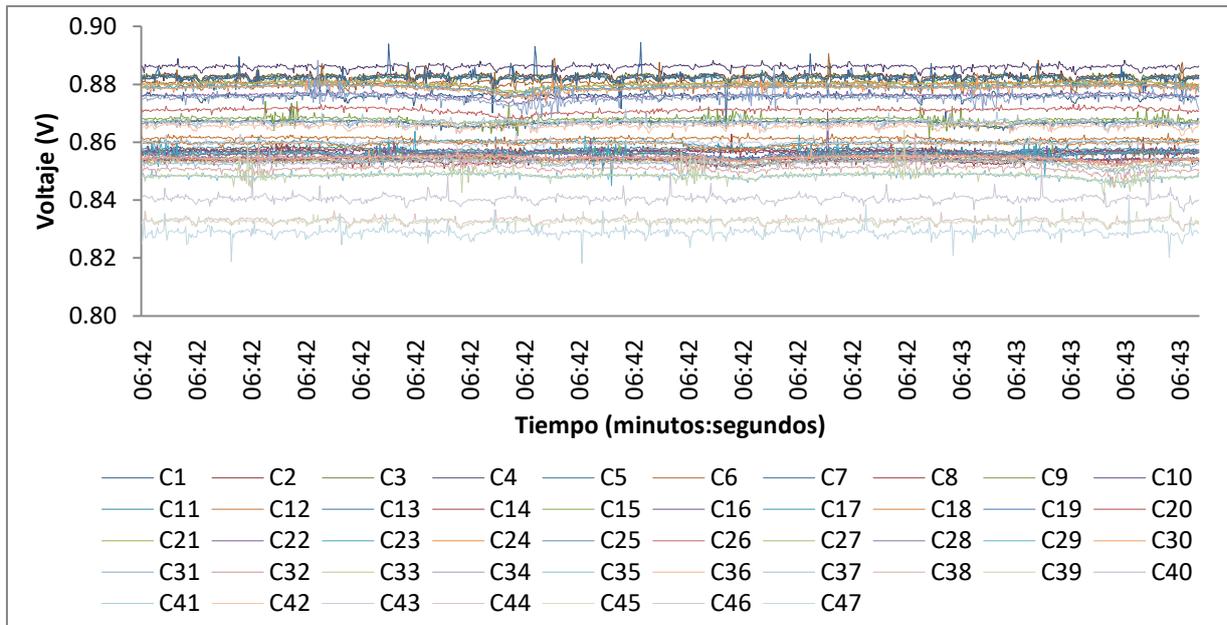


Figura 3.11. Respuesta del voltaje en el tiempo en cada una de las 47 celdas de la pila Nexa Ballard (UEX) en operación sin carga externa.

Es importante recalcar que las conexiones realizadas para medir los voltajes en cada una de las celdas ubican a las primeras cerca de la entrada de hidrógeno y a las últimas cerca del compresor de aire. En el gráfico de distribución de voltajes por celdas de la figura 3.12, se observa una tendencia a valores promedios menores en celdas cercanas al compresor que corresponden al cátodo de la pila de combustible:

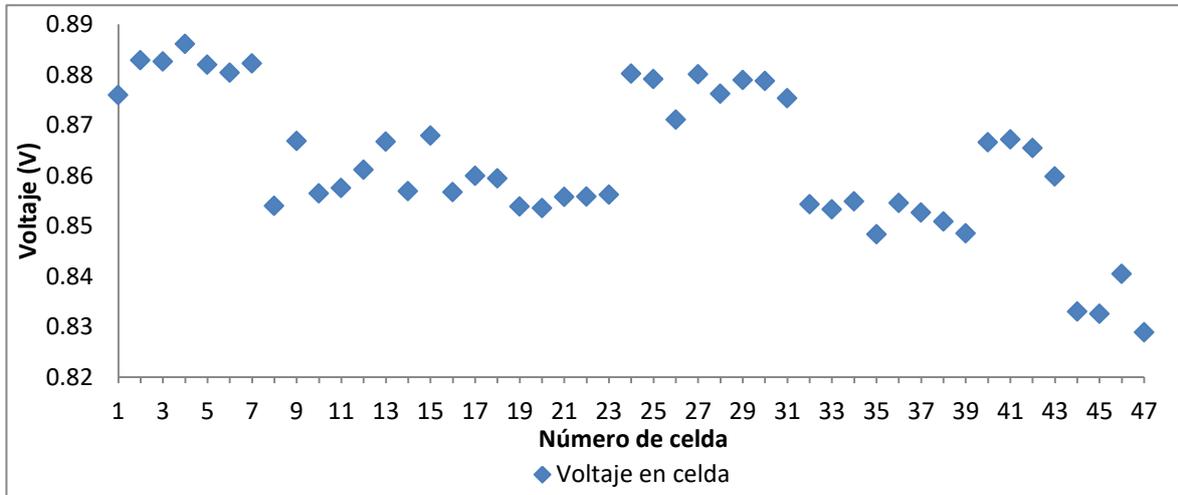


Figura 3.12. Dispersión de voltajes para cada una de las celdas de la pila de combustible de la UEX.

El gráfico de voltaje en el tiempo correspondiente a la pila CNH, para un tiempo de 57 segundos, se muestra en la figura 3.13, en la que se evidencia un máximo de voltaje en la celda 14 y es de 978 mV. El mínimo corresponde con la celda 21 y es de 703 mV:

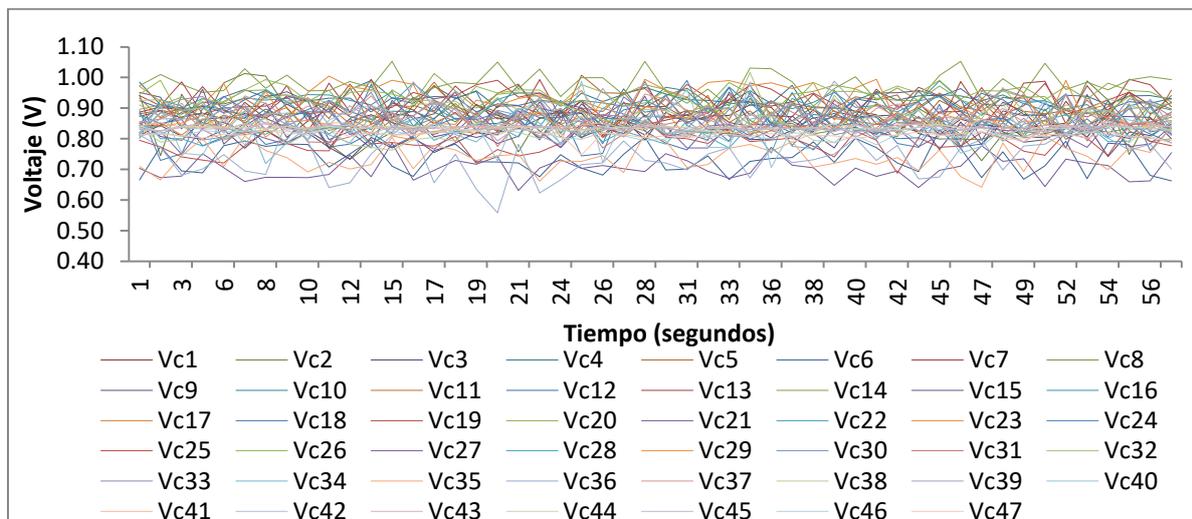


Figura 3.13. Respuesta del voltaje en el tiempo para cada una de las 47 celdas de la pila CNH sin carga externa.

Si se comparan los voltajes de ambas pilas, se observa un gráfico como el de la figura 3.14, en el cual se distingue una tendencia similar en su comportamiento. El voltaje promedio de la pila CNH de 937 mV y en la UEX 868 mV. La diferencia entre estos valores es de 69mV, lo cual no

representa variación significativa según análisis de inferencia estadística.

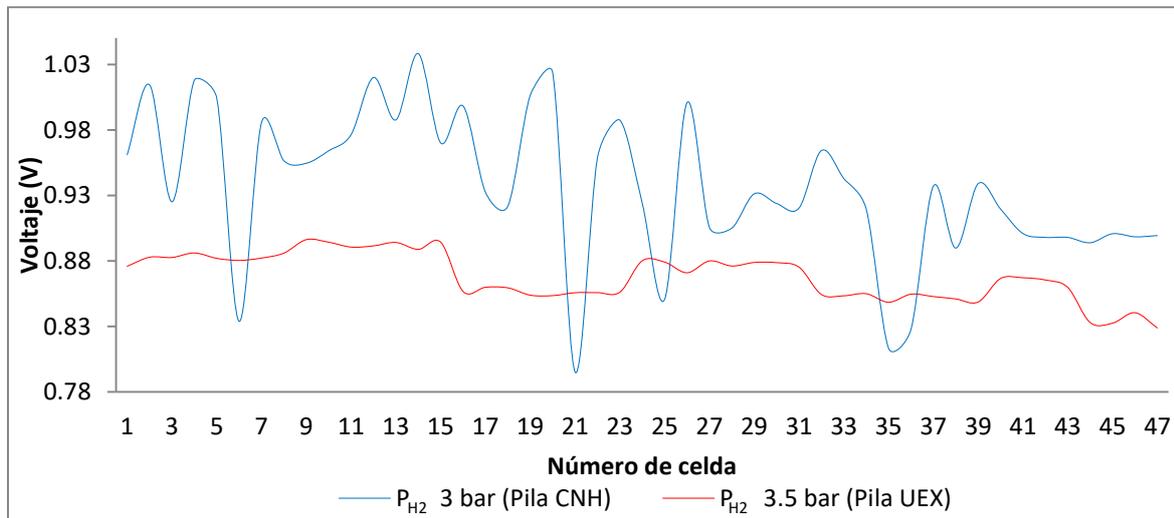


Figura 3.14. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas sin aplicar carga externa para dos pilas de combustible (UEX y CNH).

Por otro lado, y como indican Ashraf Khorasani, Asghari, Mokmeli, Shahsamandi & Faghih Imani (2010), para obtener un indicador de la correcta operación de las membranas de intercambio protónico y verificar si existen fallos físicos como ruptura de membranas, fugas de hidrógeno o alguna operación relacionada con fatiga de la pila o envenenamientos, es importante analizar el gráfico voltaje en el tiempo. En esta representación se puede evidenciar algún fallo físico en una o varias celdas con solo observar una caída extrema del voltaje.

Tomando esto en consideración y para poder evaluar el funcionamiento de estos sistemas, se utilizan los gráficos de las figuras 3.11 y 3.13. En ellos se puede observar que no existe ninguna caída de voltaje extrema en las 47 celdas para ambas pilas, por lo cual se puede inferir que ambas pilas operan correctamente.

3.3.1.3.5 Comparativa de operación utilizando dos sistemas de medición: UEX y CNH con carga externa

En la figura 3.15 se muestra un gráfico que refleja la comparación entre mediciones de las 47 celdas en ambas pilas UEX y CNH. Para las pruebas se han utilizado presiones entre 0.5 y 7.5 bar para la pila UEX y 3 bar para pila CNH. A su vez, entre cada grupo de medidas se registraron las mismas condiciones iniciales de operación y la carga aplicada fue de 3 y 2.7 amperios (pila CNH y UEX respectivamente). No se trabajó con intensidades superiores al rango mencionado ya que se quería evitar que existieran umbrales o pérdidas de activación que se consiguen con cargas superiores.

Para todas las presiones se muestra un comportamiento o tendencia similar en ambos gráficos, con el consiguiente predominio de valores o niveles de tensión más bajos en las últimas celdas de ambas pilas, como se muestra en las figuras 3.15 y 3.16:

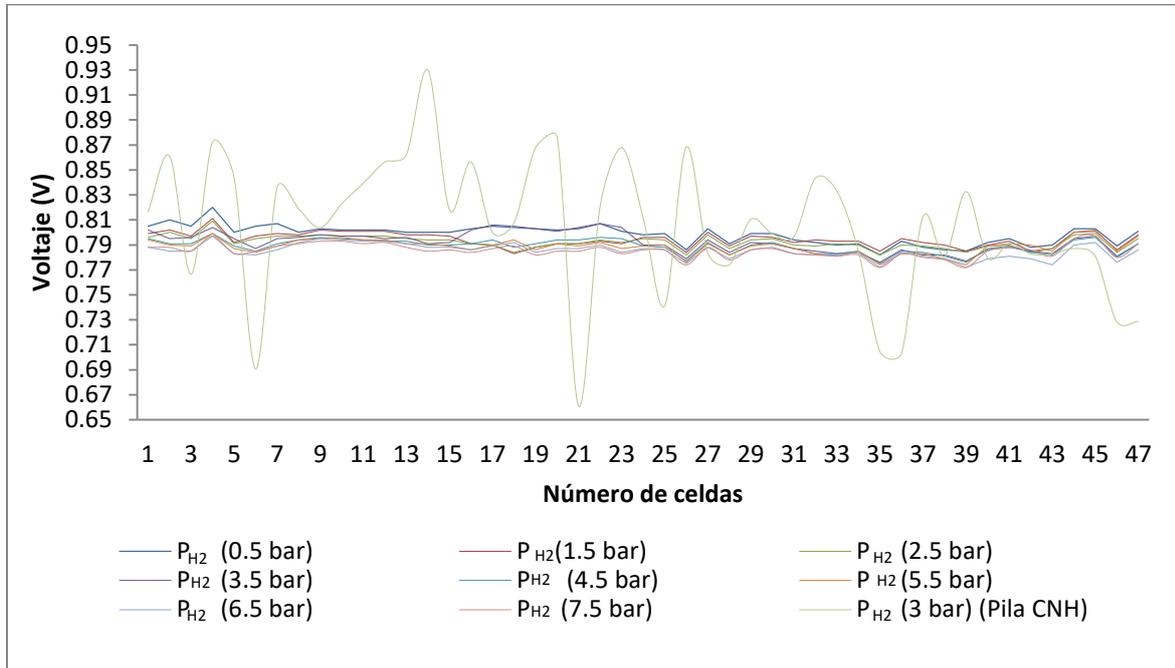


Figura 3.15. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas con carga externa variando presión de regulador de entrada de H₂ en pila UEX y aplicando 3 bar en pila CNH.

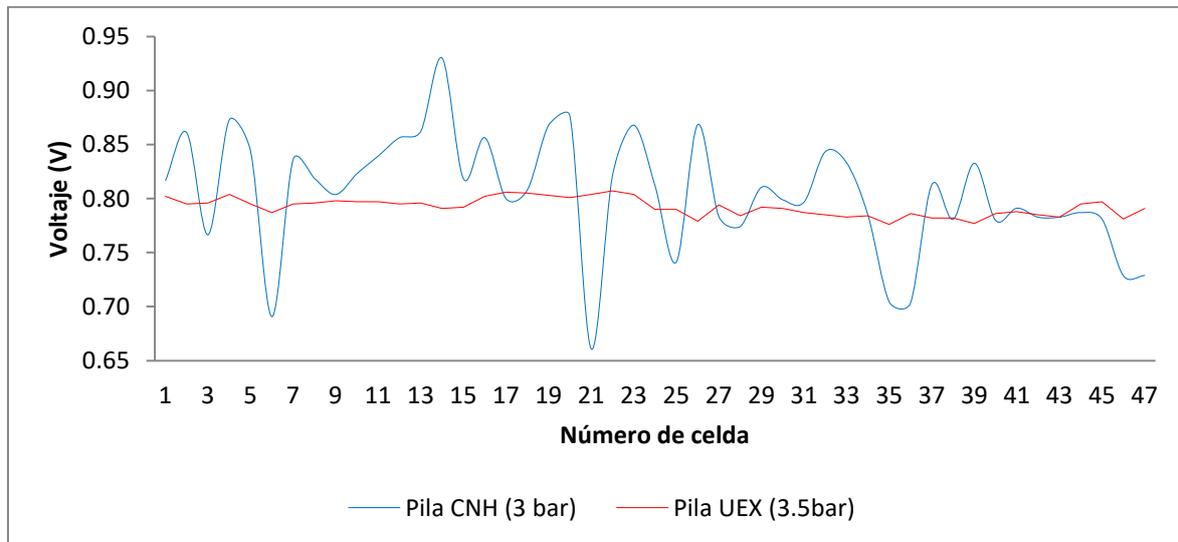


Figura 3.16. Gráfico comparativo de respuesta de voltaje en 47 celdas con carga externa para dos pilas de combustible UEX (3.5 bar) y CNH (3bar).

El gráfico de barras de la figura 3.17 muestra un voltaje máximo de 804 mV y mínimo de 776

mV, en la celda 21 y 35 respectivamente, para la pila UEX. Asimismo, en la pila CNH se registra un valor máximo en la celda 14, siendo este de 930 mV, y en la celda 21, el mínimo, con un valor de 660mV:

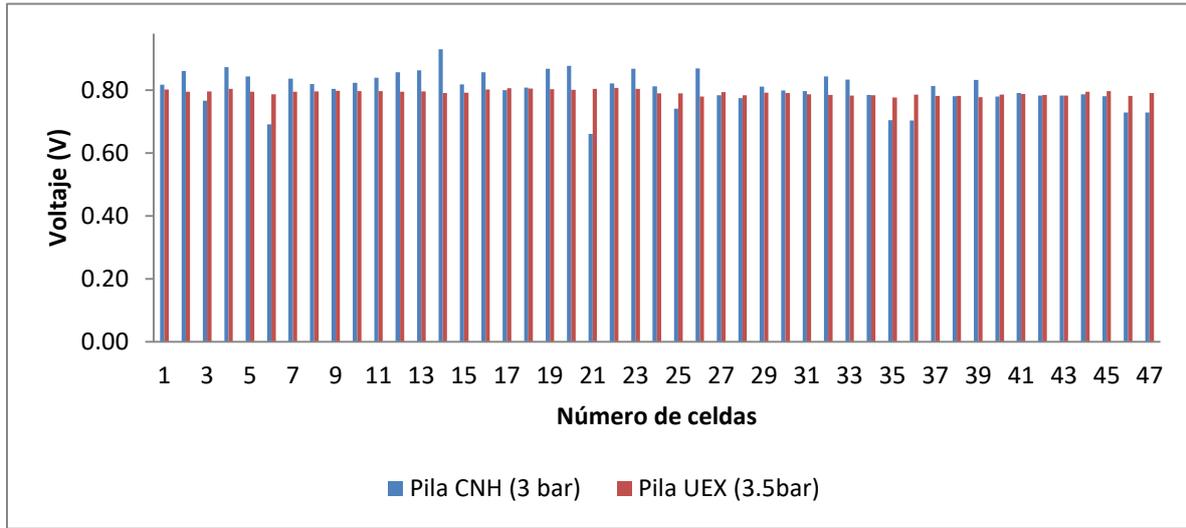


Figura 3.17. Distribución de voltajes en 47 celdas con carga externa variando presión de regulador de entrada de H₂ en pila UNEX (3.5 bar) y 3 bar en pila CNH.

El promedio de voltajes en estas condiciones de operación es de 805 mV para la pila CNH y en la UEX 792 mV. Si se realiza una diferencia entre estos dos valores, se encuentra que está en torno a los 13 mV y no representa variación significativa. En las figuras 3.18 y 3.19 se muestra el gráfico voltaje versus tiempo para ambos sistemas:

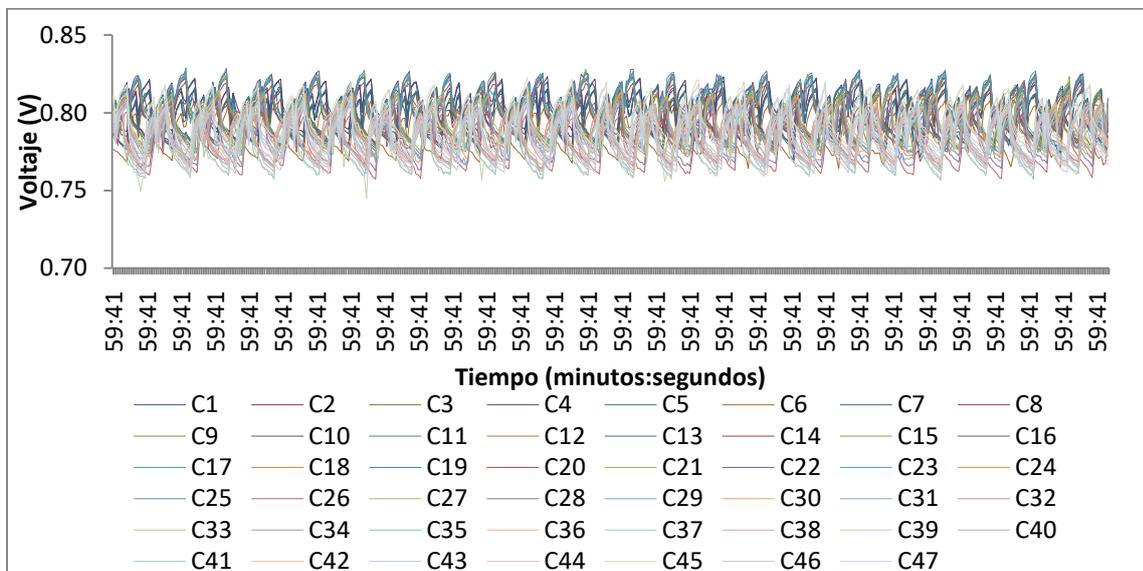


Figura 3.18. Respuesta del voltaje en el tiempo aplicando carga externa (2.7A) en cada una de las 47 celdas en la pila UEX.

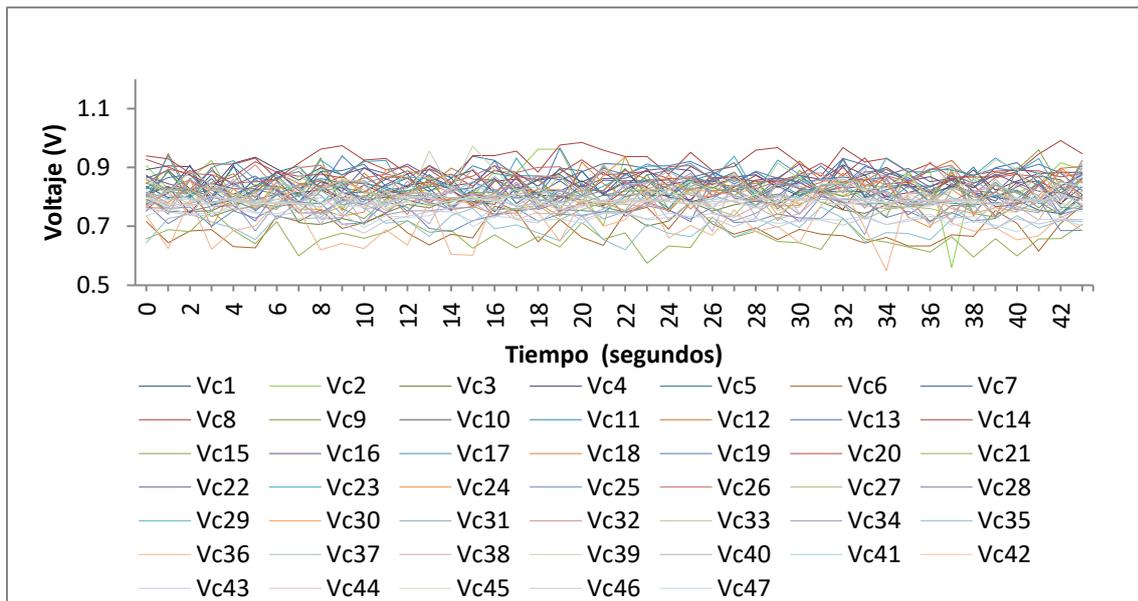


Figura 3.19. Respuesta del voltaje en el tiempo aplicando carga externa (3A) en cada una de las 47 celdas en la pila CNH.

3.3.1.4. Curva de polarización

La curva de polarización se obtuvo de manera experimental, a través de ensayos en los que eran demandadas diferentes corrientes por la carga electrónica Prodigit. En la figura 3.20 se muestra la curva obtenida y se distinguen las tres regiones de pérdidas que se dan en estos sistemas. En primera instancia, en el área R1 se observa una caída de tensión o descenso en el voltaje inicial de la pila, el cual está asociado a las velocidades de las reacciones electroquímicas al inicio de la puesta en marcha del sistema. En la segunda región denominada R3 o región de pérdidas óhmicas, se observa una tendencia bastante lineal del voltaje en función de la corriente demandada, todo ello debido a las resistencias asociadas a los electrodos y electrolitos. En la última región R3, cuando la pila operaba a densidades un poco más altas de corriente —en este caso, hasta un máximo de 23.29 A—, se nota una leve caída de potencial. Este descenso contrasta con la región dominada por pérdidas óhmicas R2, ya que se aparta del comportamiento lineal con respecto a la densidad de corriente. Esto es debido a que existen pérdidas asociadas a la concentración de los combustibles necesarias para que produzcan las diferentes reacciones redox y se genere electricidad.

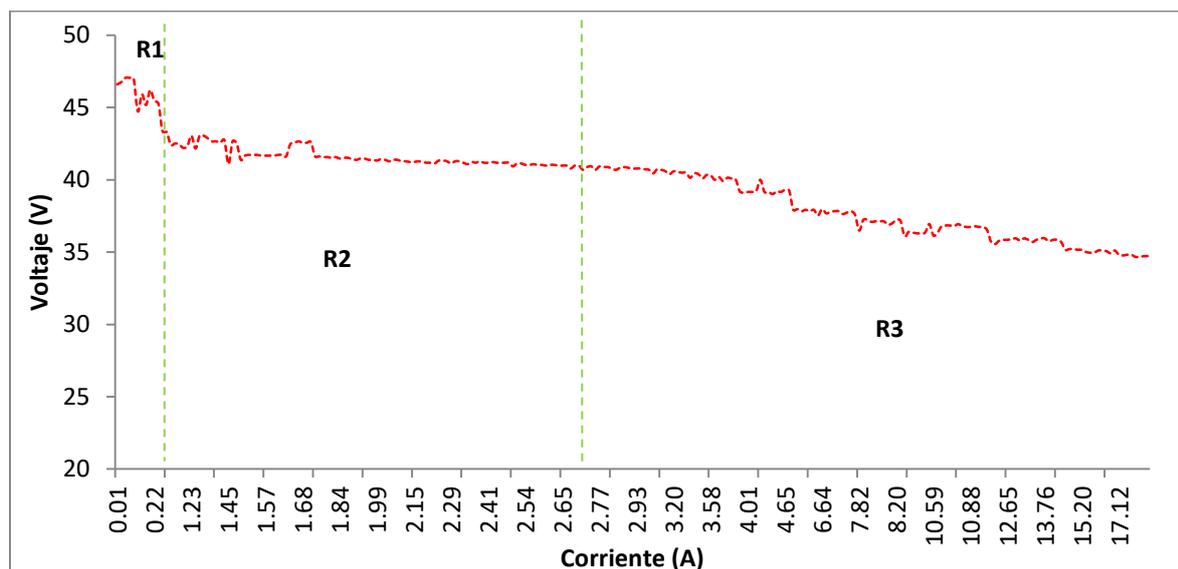


Figura 3.20. Curva de polarización de la pila de combustible CNH a presión de 2.5 bar y temperatura ambiente 28°C (R1, R2 y R3 representan las tres regiones de pérdidas).

Por otro lado, se observa que la relación entre la corriente demandada y el potencial entre terminales es inversamente proporcional, lo que se evidencia en la caída de voltaje entre terminales del stack al exigirle mayor potencia. De esto se puede añadir que, al existir un buen control o relación entre ambas magnitudes, se evita la caída abrupta de potencial.

3.3.2 Comportamiento dinámico y respuesta transitoria

En este apartado se estudia el comportamiento dinámico de la pila de combustible CNH y de las celdas que la componen, realizando ensayos con variación regular e irregular de carga, arranque y apagado de la pila. Por otro lado, se emplearon gráficos de voltaje de celda y stack contra el tiempo para observar cambios instantáneos que ocurren en este tipo de operación, que por lo general se aplica a sistemas comerciales, en donde la pila tiene que responder rápidamente a demandas instantáneas de potencia.

3.3.2.1 Respuesta transitoria del voltaje y corriente de stack durante la secuencia de arranque de la pila

Para los ensayos, se ajusta la presión de hidrógeno a 2.5 bar y se registra una temperatura ambiente de 25°C. Se aplica una corriente de 5 amperios hasta que la temperatura del stack alcance el equilibrio (temperatura constante). Para estos ensayos, se utiliza el código de estado de la pila, donde 0 = secuencia de reposo (Standby), 1 = secuencia de puesta en marcha y 2 = operación normal (Running).

Las características de las respuestas transitorias de corriente y voltaje en la etapa de arranque durante 79s se muestran en la figura. 3.21. Después de 25s de secuencia de reposo, el sistema de pila de combustible entra en la etapa de puesta en marcha. El voltaje de la celda comienza a aumentar a los 3s y alcanza aproximadamente 43V (es decir, voltaje de circuito abierto, OCV) a los 13 s. Durante esta etapa, la pila no genera corriente debido a la ausencia de demanda de carga. Después de 15s, la corriente sube ligeramente a 1.34 A, lo que indica una preparación para la operación normal. A los 65s, se aplica una carga externa y la corriente comienza a aumentar rápidamente y alcanza un estado estable, aproximadamente a 12 A, mientras que el voltaje de la celda cae a aproximadamente 35 V.

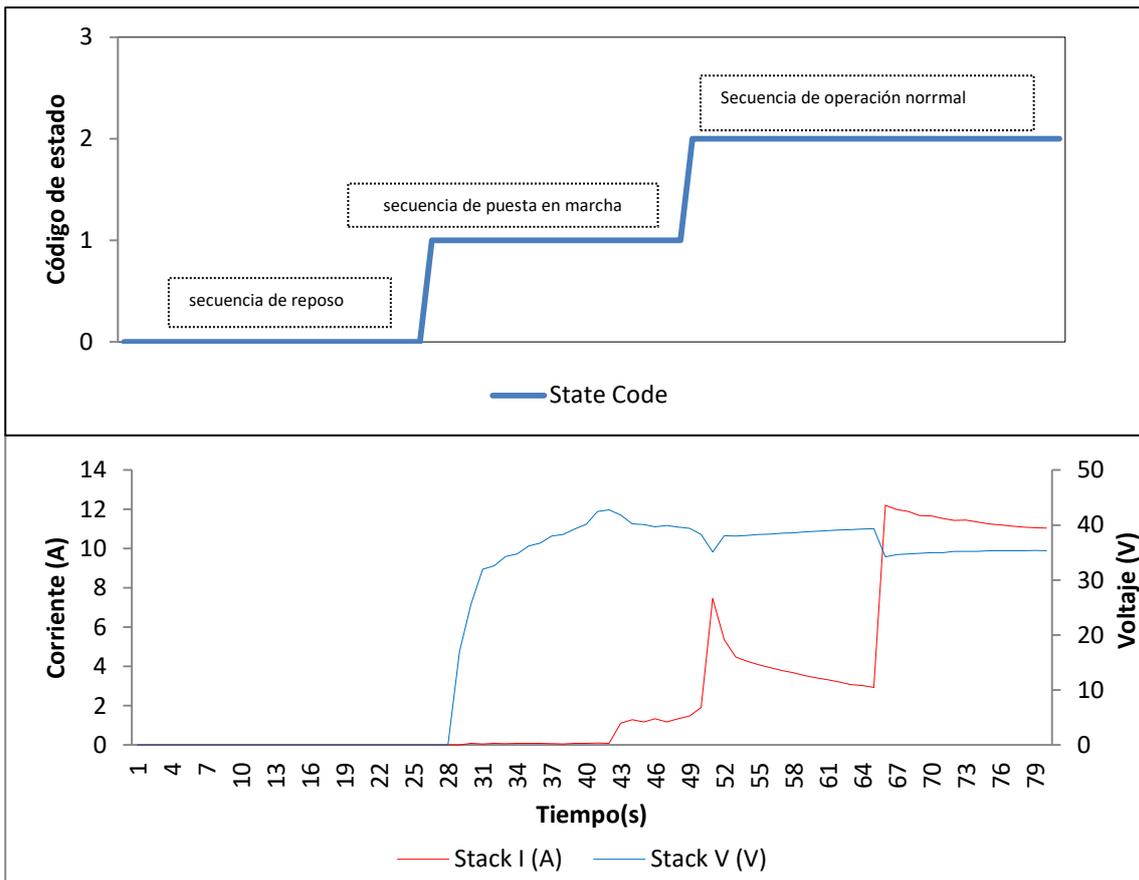


Figura 3.21. Respuesta transitoria del corriente y voltaje del stack en la secuencia de arranque (códigos de estado: 0 (reposo); 1 (puesta en marcha); 2 (operación normal)).

3.3.2.2. Respuesta transitoria del voltaje de 47 celdas en la secuencia de arranque (Startup)

Las características de las respuestas transitorias de corriente y voltaje en la etapa de arranque durante 184s se muestran en la figura 3.22. Después de 96s, el sistema de pila de combustible entra en la etapa de puesta en marcha. El voltaje de las celdas empieza a aumentar a los 11s y alcanzan aproximadamente 1.02 V (es decir, voltaje de circuito abierto, OCV) a los 13 s. Durante esta etapa, no hay salida de corriente desde la pila, debido a la ausencia de demanda de carga. Después de 18 s, la corriente sube ligeramente a 3.8 A, lo que indica una preparación para la normalidad operación. A los 148s, se aplica una carga externa y la corriente comienza a aumentar rápidamente y alcanza un estado estable aproximadamente 10 A, mientras que el voltaje de las celdas caen a aproximadamente 735mV:

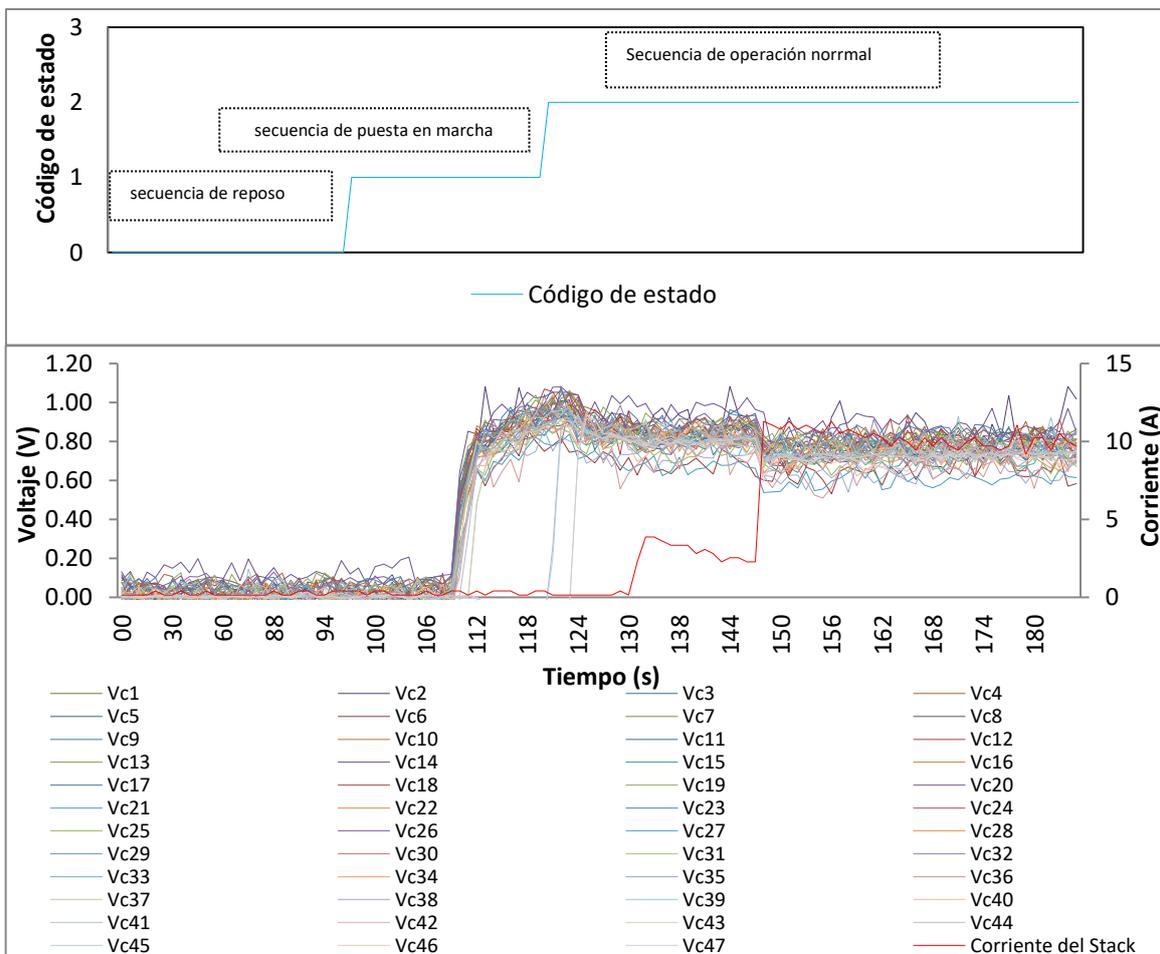


Figura 3.22. Respuesta transitoria del corriente y voltaje en 47 celdas, para la secuencia de arranque (códigos de estado: 0 (repose); 1 (puesta en marcha); 2 (operación normal)).

3.3.2.3 Respuesta transitoria del voltaje y corriente durante la secuencia de apagado de la pila

En la figura 3.23 se muestra la operación de la pila en la secuencia de apagado. En primera instancia, se aplica una carga externa de 20 amperios durante aproximadamente 590 segundos para luego eliminar esta carga. En este tiempo el voltaje sube a aproximadamente a 43 voltios, permaneciendo constante hasta que se aplica el botón de parada del sistema a los 1177 segundos, tiempo en el que el voltaje alcanza los 47 voltios. Esta secuencia de parada demora 50 segundos hasta llegar a la secuencia 0 en donde la pila entra en reposo:

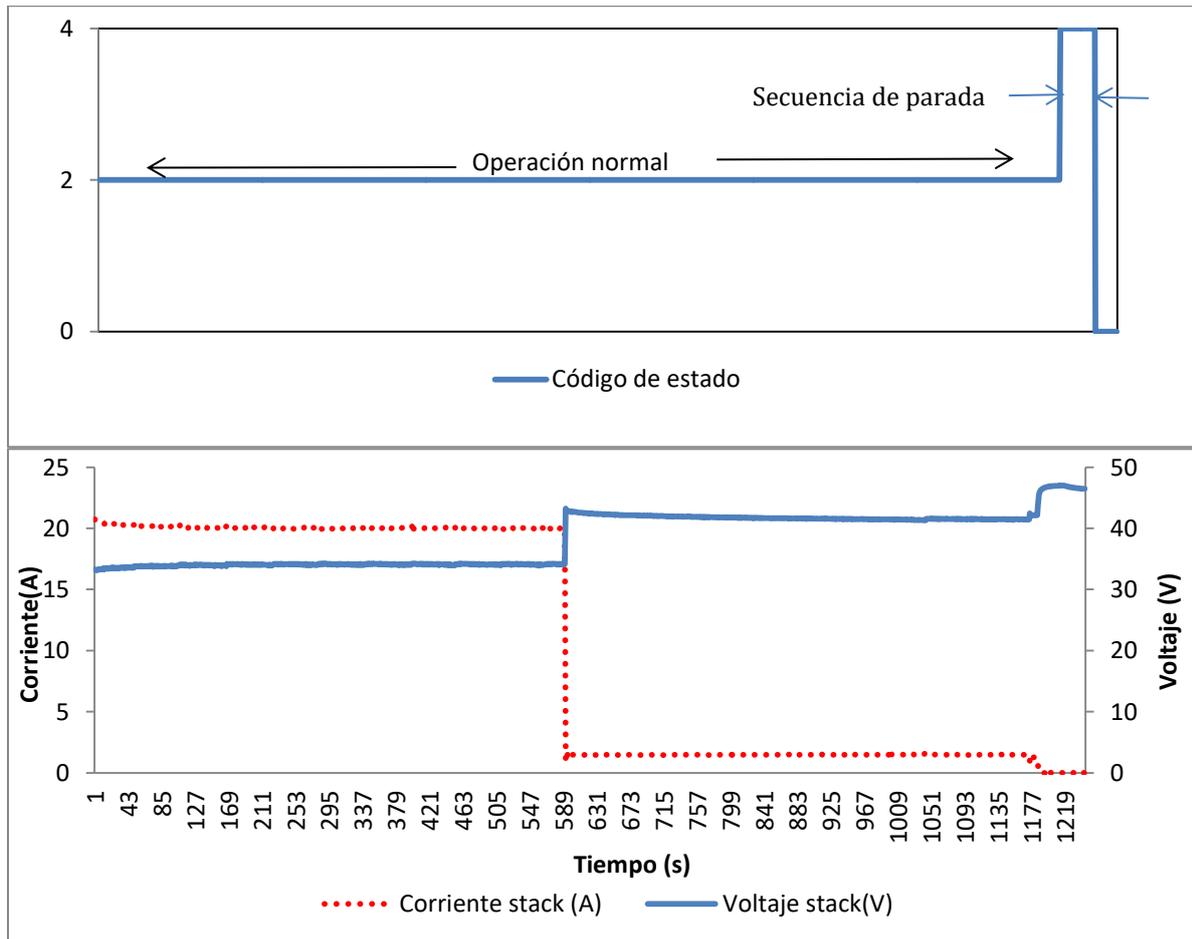


Figura 3.23. Comportamiento de voltaje y corriente del stack en la secuencia de apagado de la pila (2- operación normal, 4- secuencia de parada, 0-reposo).

3.3.2.4. Respuesta transitoria del voltaje de 47 celdas en la secuencia de parada (Shutdown)

En la figura 3.24 se muestra la secuencia de parada del voltaje en las 47 celdas de la pila. Se observa claramente la aplicación de una carga de 10 amperios durante 40 segundos aproximadamente, tiempo en el que se desactiva la carga y el voltaje de todas las 47 celdas sube a aproximadamente a 1 voltio y permanece constante. A los 160 segundos se aplica el botón de

parada del sistema y los voltajes alcanzan 1.09 voltios. Esta secuencia de parada demora 40 segundos hasta llegar a la secuencia 0 en donde la pila entra en reposo.

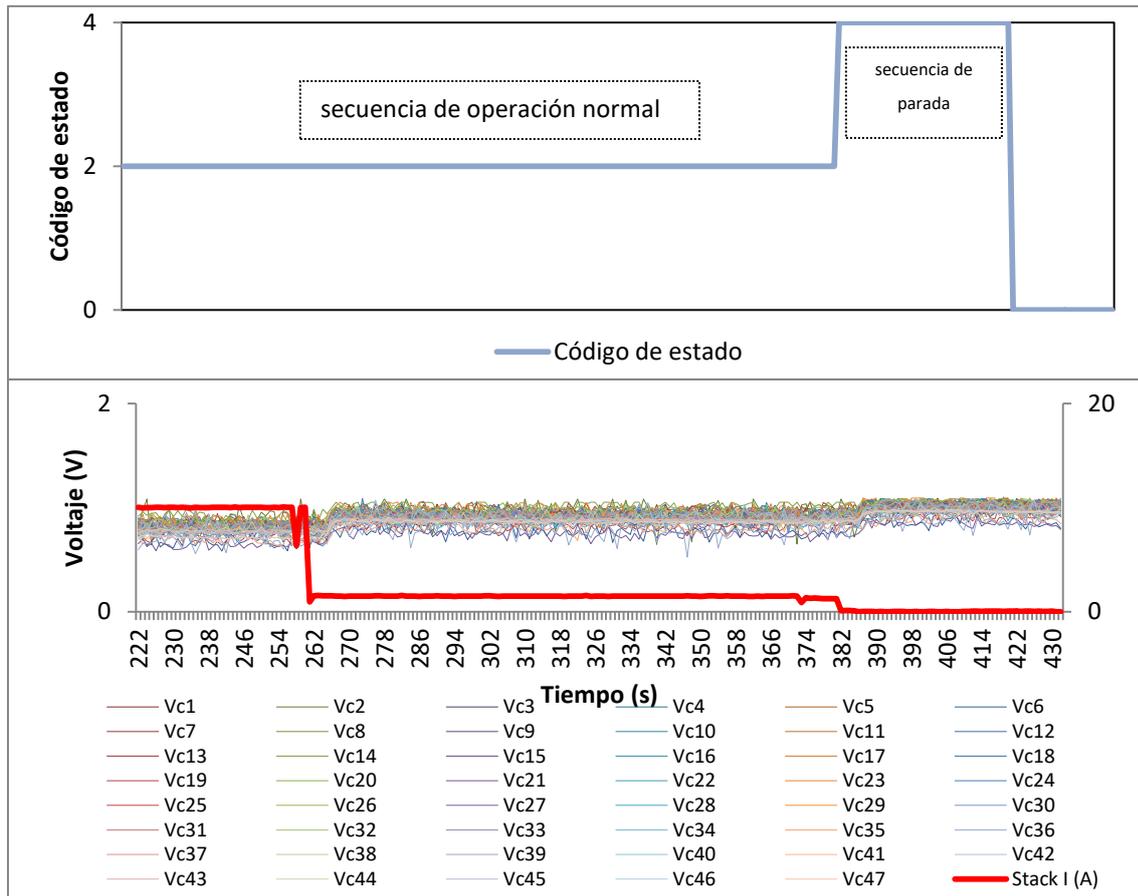


Figura 3.24. Comportamiento de voltaje y corriente de cada una de las 47 celdas en la secuencia de apagado de la pila. (2-operación normal, 4- secuencia de parada, 0-reposo).

3.3.2.5. Respuesta transitoria del voltaje del stack ante variaciones de corriente de carga

Al aplicar dos escalones de carga externa (10 y 5 A), se observa un pico de bajada y subida instantáneo de la señal de voltaje que coincide en el punto transitorio de carga y reacciona rápidamente a los incrementos en la corriente demandada. Estos picos de subida y bajada pueden estar asociados a las velocidades en las reacciones electroquímicas que ocurren en las celdas (transporte de agua, de hidrógeno, oxígeno), todo ello debido a la velocidad con que se mueven los gases en los canales de flujo y en los difusores, que tienen que ajustarse rápidamente al momento de aplicar un escalón de carga (figura 3.25). Este fenómeno se puede asociar a las capacitancias de doble capa existentes entre el electrodo y el electrolito, que surgen como consecuencia de los potenciales eléctricos que se crean debido a la separación de cargas.

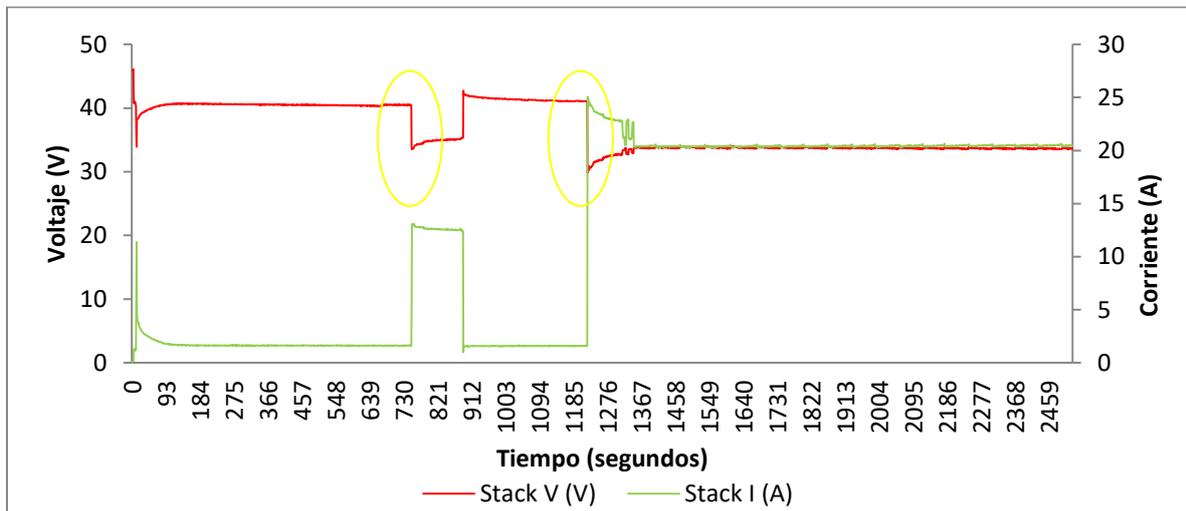


Figura 3.25. Respuesta transitoria del voltaje y la corriente del stack al aplicar dos escalones de carga (5 y 10 A).

3.3.2.6. Respuesta transitoria del voltaje de celdas ante variaciones de corriente de carga

Al aplicar dos escalones de carga externa (10 y 5 A), se puede observar que los voltajes de todas las celdas responden rápidamente a los incrementos en la corriente, para luego alcanzar un estado estable, como se muestra en la figura 3.26:

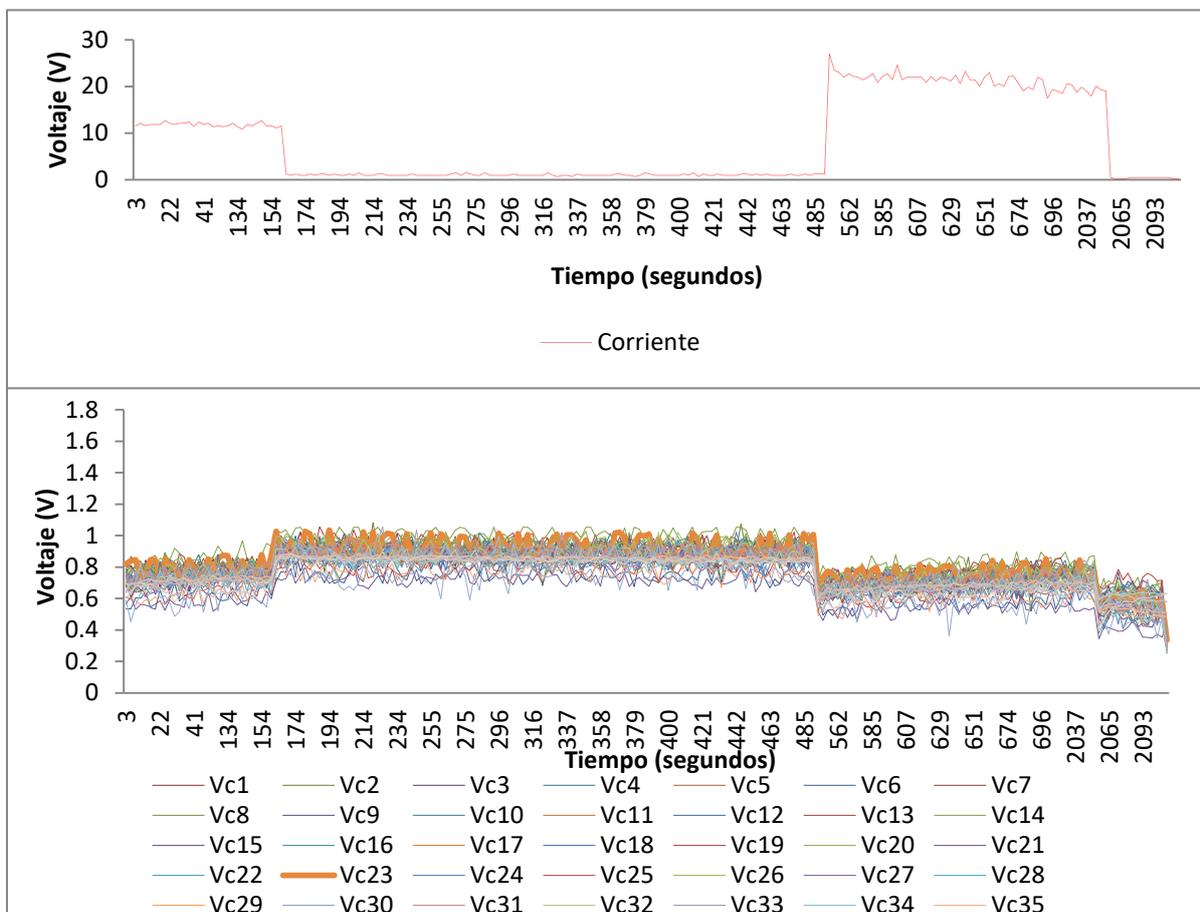


Figura 3.26. Respuesta transitoria del voltaje en cada una de las 47 celdas de la pila Nexa ballard (CNH) 1.2 Kw para escalones de 5 y 10 A.

Por otro lado, el decremento de los voltajes al momento de aplicar los escalones es proporcional a la corriente aplicada. En este sentido, si se toma en cuenta la celda de la figura 3.27, para escalones de 5 A el voltaje promedio en la celda decayó 138mV de los 861mV alcanzados en operación sin carga, y al aplicar 10 A, este fue de 260mV, casi el doble como se muestra en la figura 3.27:

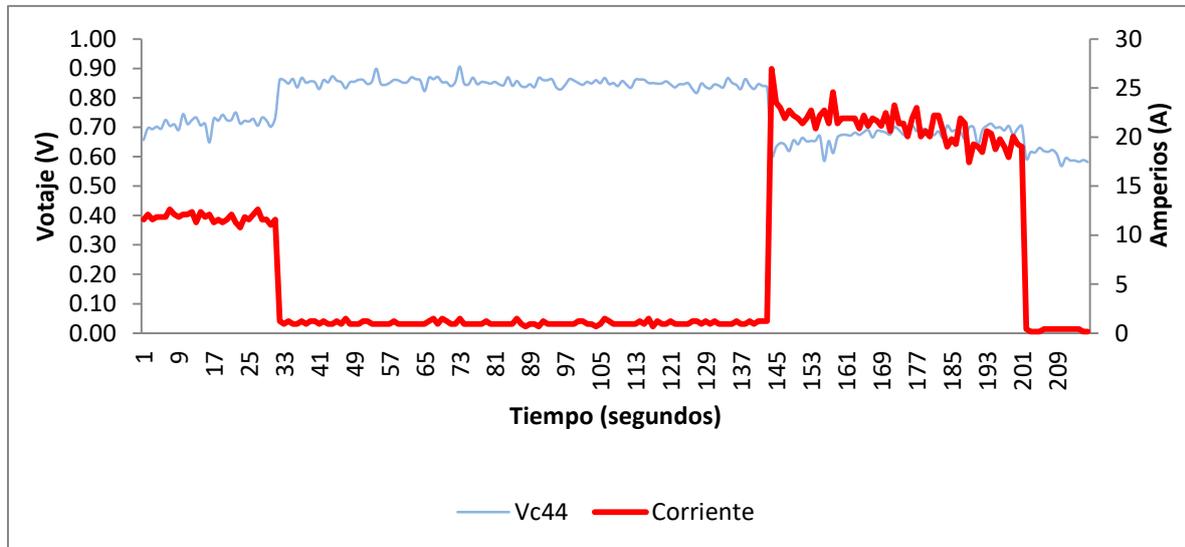


Figura 3.27. Respuesta transitoria del voltaje en una celda al aplicar escalones de 5 y 10 A.

3.3.2.7 Respuesta transitoria de la temperatura del stack ante variaciones de corriente de carga

Al aplicar dos escalones de corriente de 5 y 10 A, existe un aumento de la temperatura del stack (figuras 3.28 y 3.29), que responden al incremento de carga. Sin embargo, a diferencia del comportamiento del voltaje y la corriente, no se observa un pico extremo o transitorio en el cambio de carga:

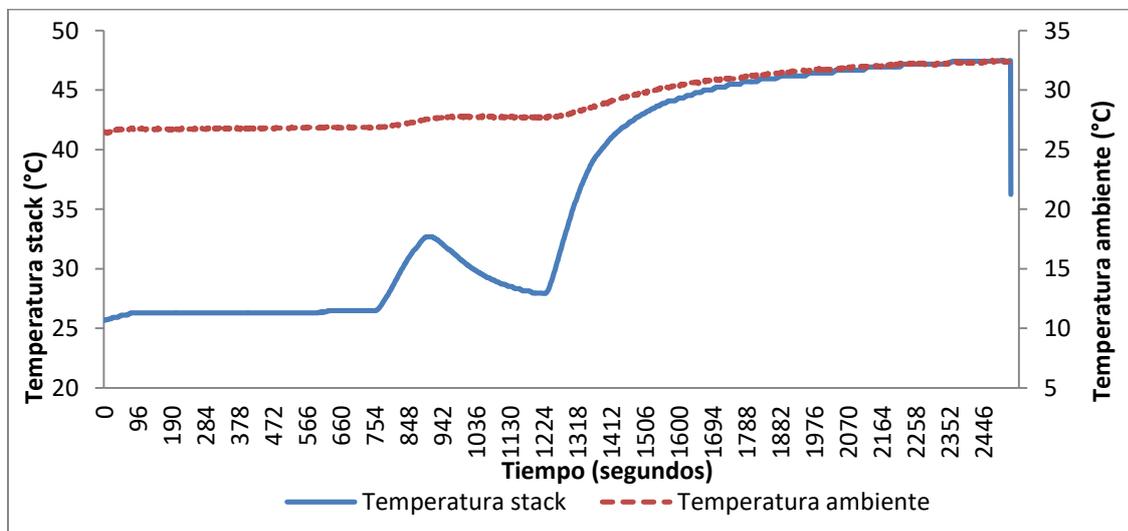


Figura 3.28. Seguimiento de la temperatura del stack y ambiente al aplicar dos escalones de carga (5 y 10 A).

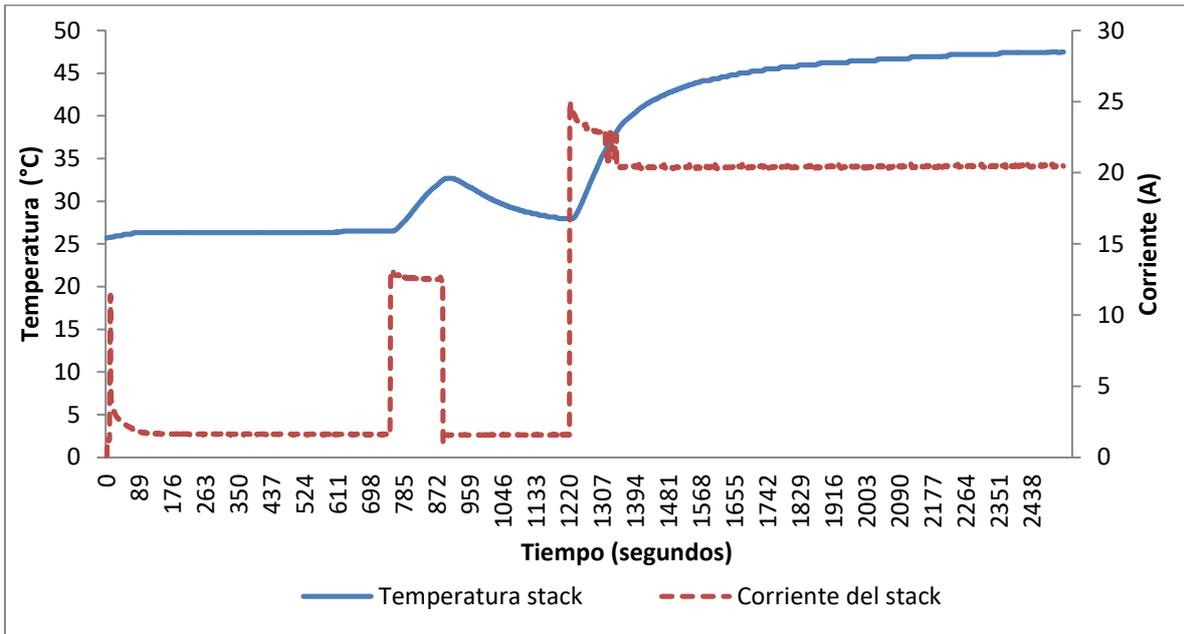


Figura 3.29. Respuesta de la temperatura del stack a escalones de carga (5 y 10 A).

3.3.2.8. Respuesta transitoria de la temperatura de celdas ante variaciones de corriente de carga

La figura 3.30 muestra la respuesta proporcional de la temperatura en celdas con la corriente de carga, al aplicar 7 escalones 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5 amperios. Se puede observar una respuesta atenuada sin extremos, a diferencia del comportamiento del voltaje y que responde rápidamente al aumento de la corriente. Esto es así, ya que, para poder hacer frente a la demanda de potencia, las reacciones dentro de cada celda aumentan y con el consecuente aumento de las temperaturas, aumenta la conductividad de las membranas para entregar mayor corriente.

Cabe señalar que la carga total que maneja a la pila es la carga externa aplicada con la carga electrónica Prodigit, además de la exigida por sus sistemas auxiliares:

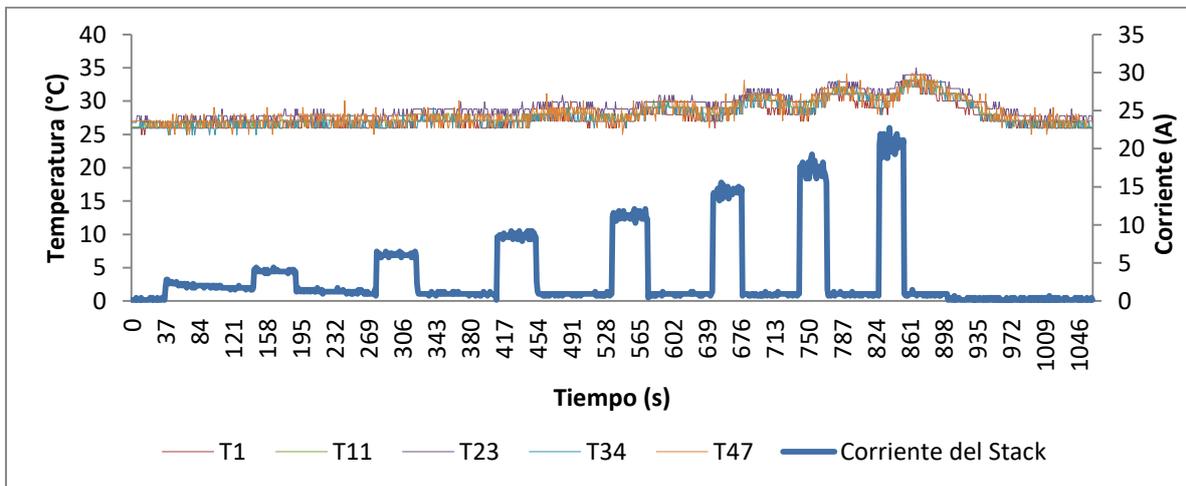


Figura 3.30. Respuesta de la temperatura en celdas del stack a escalones de carga.

3.3.2.9. Respuesta transitoria del voltaje del stack y celdas ante incrementos de carga escalonados

Se puede observar que existe una respuesta rápida del voltaje en función de la corriente demandada, además de un decremento proporcional al exigirle más corriente a la pila (figuras 3.31 y 3.32). La sobretensión y el bajo voltaje que se produce al momento de hacer cambio en la corriente de carga se ponen de manifiesto de manera más evidente en las escalas más altas de corriente, por lo que se evidencia claramente su relación con la magnitud del escalón de intensidad. Se observa también un pico transitorio en la etapa inicial que coincide con la operación de purga del sistema:

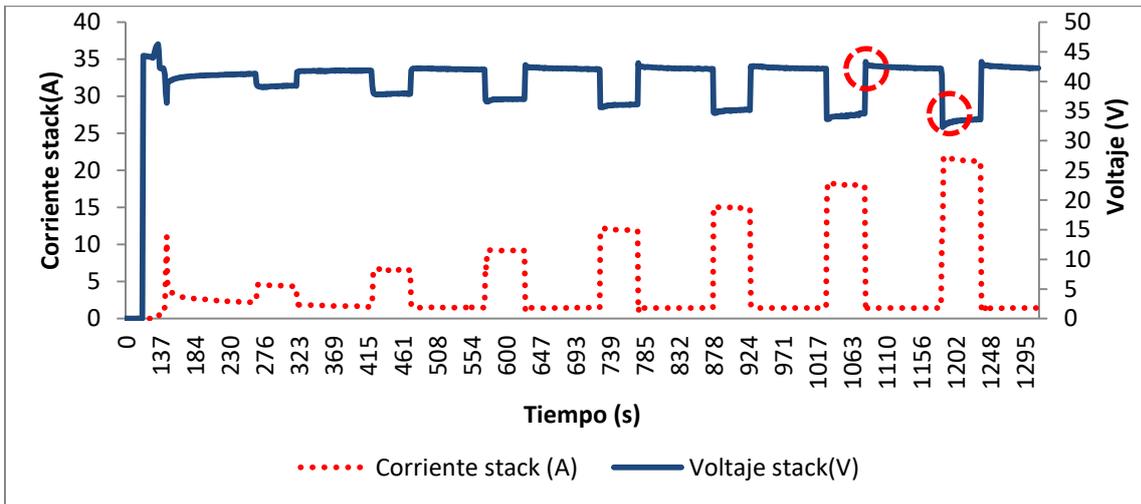


Figura 3.31. Respuesta transitoria del voltaje en celdas al aplicar 7 escalones de carga.

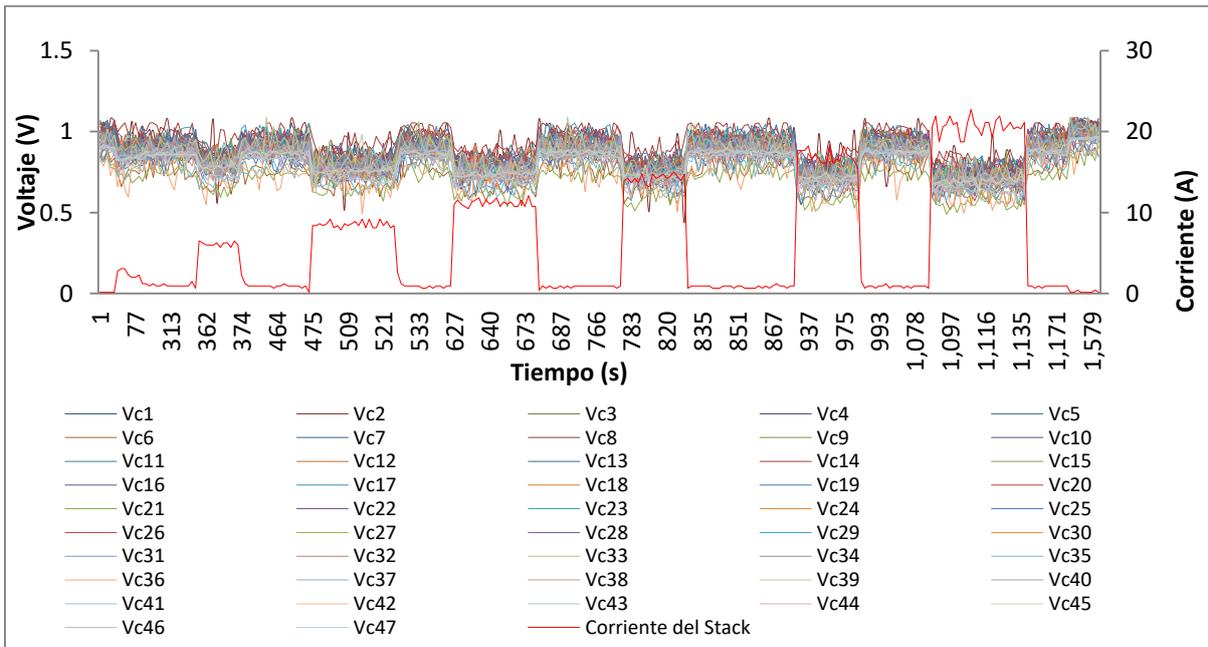


Figura 3.32. Respuesta transitoria del voltaje en celdas aplicando 7 escalones de carga.

3.3.2.10. Respuesta transitoria del voltaje y corriente durante variación continua de la carga, sin paradas

Se puede observar, haciendo comparación con los gráficos de las figuras 3.33 y 3.31, que al aplicar una variación de carga constante, sin realizar paradas para el cambio de carga realizado por el sistema de Prodigit, la respuesta del voltaje tiene una representación atenuada, sin observar picos de voltajes debido a que la carga aumenta constantemente y le da tiempo al compresor de aire para ajustar la velocidad y por ende las reacciones que ocurren en las celdas no se ven drásticamente afectadas:

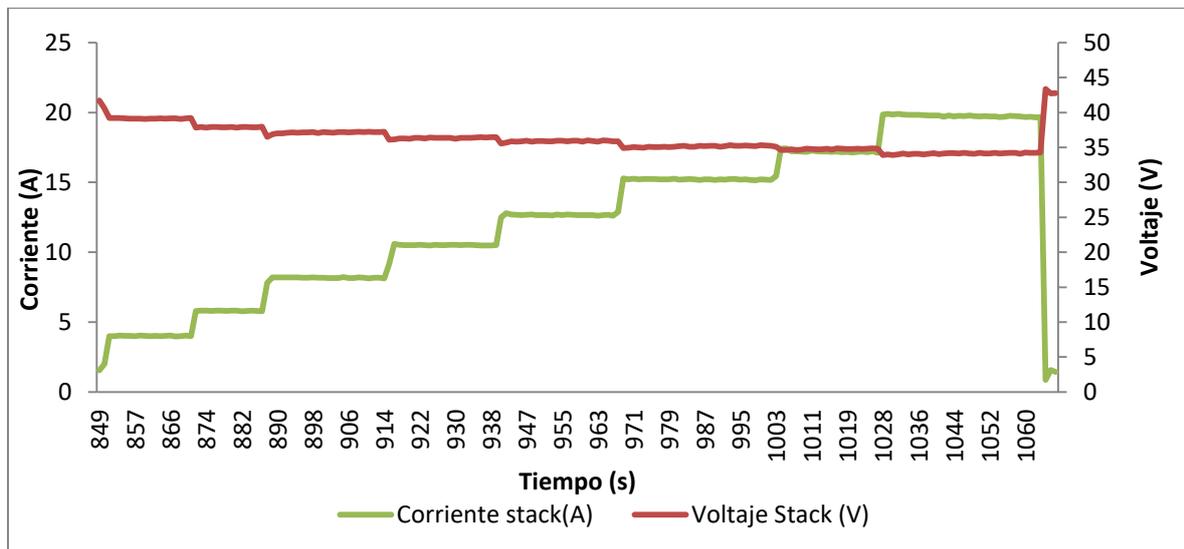


Figura 3.33. Comportamiento de voltaje y corriente del stack ante variación de carga sin paradas.

3.3.2.11 Respuesta transitoria del voltaje, corriente y estatus de purga durante variación de carga escalonadas

La figura 3.34 muestra la respuesta del voltaje y la corriente ante las operaciones de purga del sistema para un tiempo de 27 minutos. En la misma, se muestra, a los 2 minutos, la primera purga del sistema que se realiza para llenar el stack con hidrógeno. Asimismo, durante la aplicación de escalones, la purga no se activa y tiene un estado de 2, que corresponde a desactivación. Entre los 23 y 25 minutos se abre la válvula de purga y pasa a estado abierto, realizando purgas consecutivas para eliminar residuos de agua y gases producidos por las reacciones durante la operación.

En el mismo gráfico se puede observar claramente que la corriente o intensidad de la pila no tiene tanta afectación por las operaciones de purgas, lo que no ocurre con el voltaje de la pila en el que se observa oscilaciones bastantes pronunciadas:

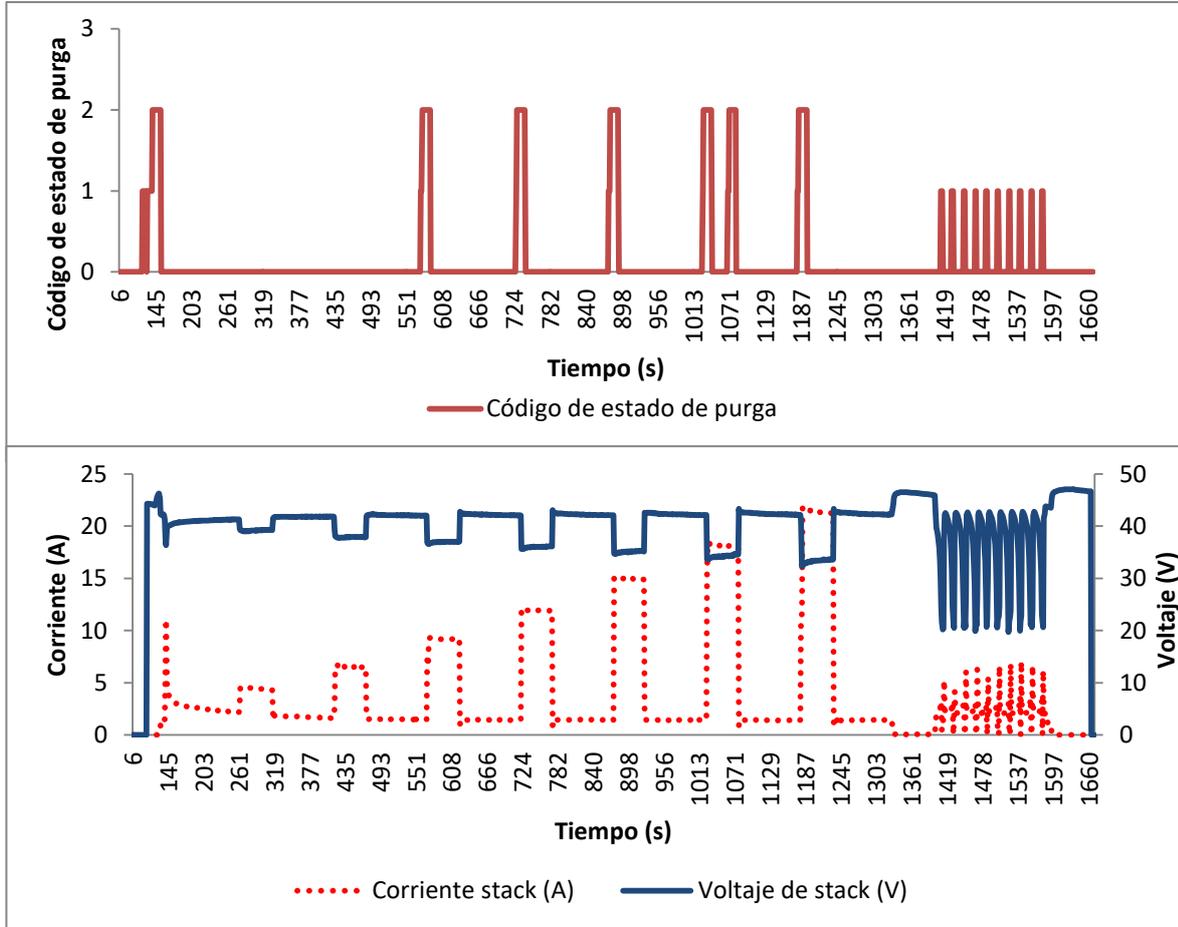


Figura 3.34. Respuesta transitoria de corriente, voltaje del stack y estatus de purga en operación de carga sin paradas.

3.3.2.12 Validación de sistema de monitorización utilizando modelo matemático

Para validar el sistema, como se explica en el apartado (2), fue necesario seleccionar una ecuación que relacionara el voltaje del stack con la temperatura y corriente del mismo. En la literatura se encontró un modelo de ecuación semi-empírico en la que los autores Torreglosa & Miraoui (2009), con la ayuda del método de regresión lineal y experimentando con una pila idéntica a la utilizada en este proyecto (Ballard Nexa 1.2Kw), definen los distintos valores de sus parámetros:

$$V_{fc} = E - b \ln(i) - R_{ohm} \cdot i - m \exp(n \cdot i) \quad (3.1)$$

$b \ln(i)$ se define como la pérdida de activación, $m \exp(n \cdot i)$ representa las pérdidas de concentración, m , y n dependen de forma lineal con la temperatura del stack:

$$V = b_1 \cdot T_{st} + b_2;$$

$$R_{ohm} = R_1 \cdot T_{st} + R_2;$$

$$m = m_1 \cdot T_{st} + m_2;$$

$$n = n_1 \cdot T_{st} + n_2;$$

Los coeficientes m , b , R_{ohm} se han establecido en uno, n igual a $3.8 \cdot 10^{-4}$ y E siempre es igual a 42 V, en las condiciones iniciales para el método de regresión. Por otro lado, los valores de los parámetros son: $b_1 = 0.07$, $b_2 = 4.68$, $R_1 = 0.004$, $R_2 = 0.068$, $m_1 = 0.021$, $m_2 = -0.34342$, $n_1 = 0.000035$, $n_2 = -0.00166$. Estos corresponden a los coeficientes obtenidos por el método de regresión lineal.

Con esta ecuación se hace necesario conocer dos entradas del sistema, que son la **corriente del stack y temperatura**, que son medidas por nuestro sistema de monitorización al momento de operar la pila. Con este modelo insertado en nuestra programación, se pudieron obtener datos de voltaje del stack y compararlos con los datos obtenidos en los ensayos.

El gráfico de la figura 3.35 muestra el comportamiento del voltaje del stack obtenido con la ecuación y con el sistema de monitorización multicanal para escalones de corriente entre 3 y 10.5 amperios.

En el gráfico se puede observar que al operar sin carga externa, ambas medidas son exactamente idénticas. No es así cuando se aplica carga externa, ya que en este caso, existe una diferencia entre 2 y 3 voltios aproximadamente cuando se aplican escalones entre 1.5, 3, 4.5, 6 amperios, y entre 4 y 5 voltios al aplicar escalones de mayor amperaje.

De esto se puede deducir que nuestros datos se ajustan a la ecuación de mejor forma para operaciones sin carga externa. Sin embargo, y a pesar de esto, el comportamiento de ambas medidas sigue un patrón similar en operación con carga externa.

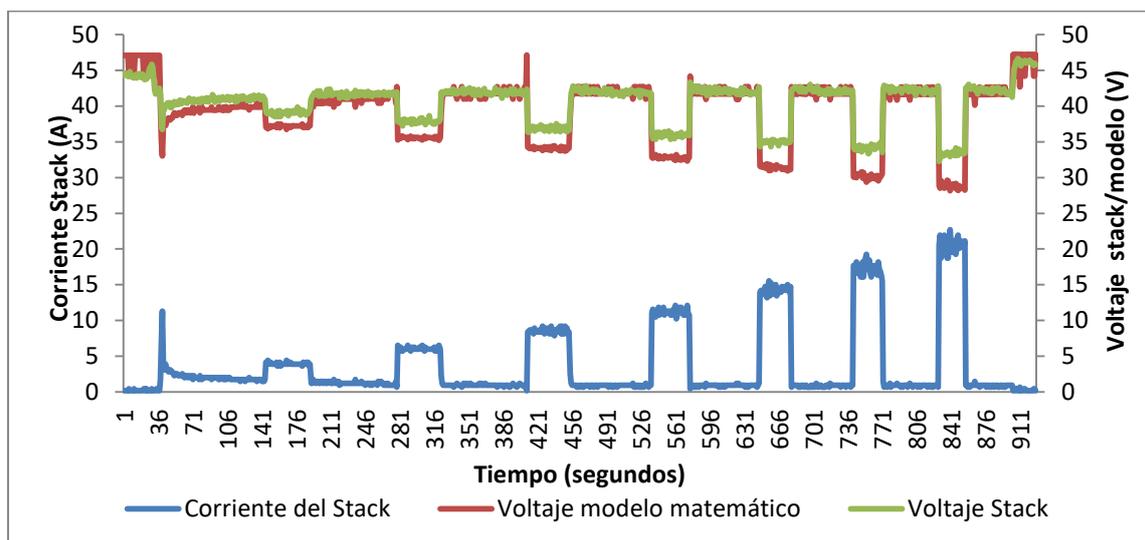


Figura 3.35. Respuesta transitoria de corriente, voltaje del stack y estatus de purga en operación de carga sin paradas.

3.4. Estadísticos descriptivos e inferenciales

3.4.1. Estadísticos para operación con y sin carga externa

En la tabla 3.3 se muestran algunos datos descriptivos de la operación de la pila CNH en modo de operación con carga y sin carga externa. En ella se observa, para la operación sin carga una media igual a 0,855+/-0.06 V y una mediana de 0,853, ambos valores bastante cercanos, por lo cual se puede deducir que la distribución de los voltajes es bastante simétrica. En operación con carga externa, ocurre lo mismo ya que se obtiene una media de 0,725 +/-0.06 V y una mediana de 0,727V.

Tabla 3.3.

Estadísticos descriptivos de operaciones con carga y sin carga externa (CNH)

			Estadístico	Desv. Error
Sin carga (PROMEDIOS)	Media		0,85505984	0,008281507
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0,83839003	
		Límite superior	0,87172965	
	Mediana		0,85288095	
	Varianza		0,003	
	Desv. Desviación		0,056775152	
	Mínimo		0,703644	
	Máximo		0,977720	
Con carga 12A (PROMEDIOS)	Media		0,72535042	0,008500950
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0,70823889	
		Límite superior	0,74246194	
	Mediana		0,72706378	
	Varianza		0,003	
	Desv. Desviación		0,058279578	
	Mínimo		0,572372	
	Máximo		0,850157	

Si se hace una comparación entre el comportamiento con y sin carga externa, se observa una diferencia significativa entre ambas medidas. En el gráfico de la figura 3.36 se muestra la distribución de los voltajes para operación con y sin carga, en el cual se representa cada variable (V_{c1} a la V_{c47}) respecto a los intervalos de confianza al 95 % de la media o promedio en cada variable y respecto a la categoría de corriente y sin corriente, lo que evidencia una diferencia significativa entre los datos sin carga y con carga:

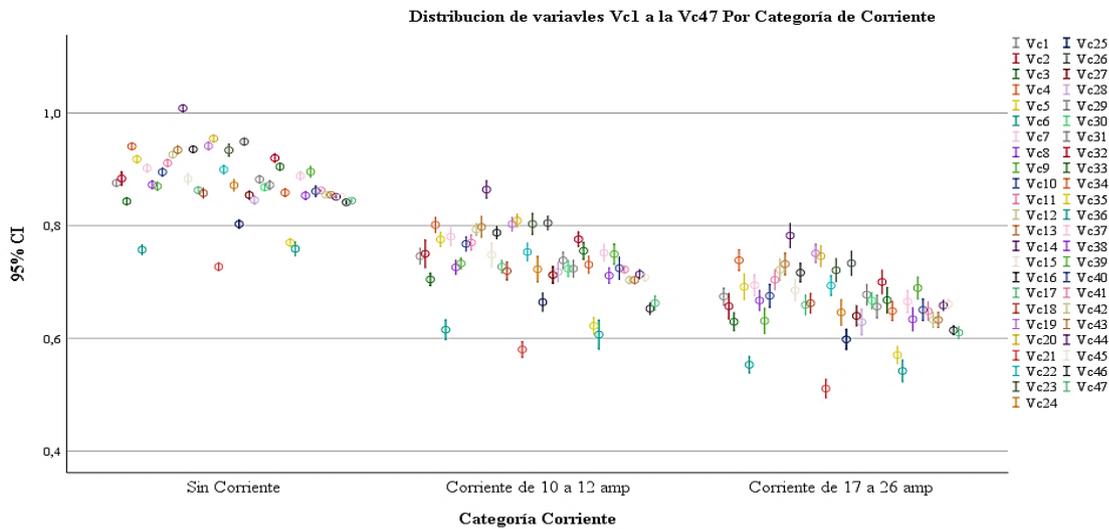


Figura 3.36. Comparativa de la distribución de voltajes aplicando rangos de corriente de carga externa.

En el análisis de inferencia estadística obtenido del programa SPSS, como se muestra en la tabla 3.4 y utilizando análisis de hipótesis, se puede afirmar que existen diferencias significativas entre los voltajes sin carga y los obtenidos con carga, ya que el valor de $Sig. = 0.00 < 0.05$ (5% significancia).

Tabla 3.4.

Análisis de significancia para diferencias entre los promedios de operación sin/con carga para pila CNH

Hipótesis Nula	Prueba	Sig.	Decisión
1 La mediana de las diferencias entre Sin carga (promedios) y Con carga (Promedios) es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	0.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0.05.

3.4.2 Estadísticos inferenciales comparativos entre sistema CNH y UEX

En la tabla 3.3 se observan algunos datos descriptivos de la operación de la pila CNH y UEX en modo de operación con carga externa. En ella se observa una media igual a 0.805 ± 0.05 V y una mediana de 0.810 en la pila CNH. A su vez, se obtiene una media de $0,792 \pm 0.008$ V y una mediana de 0,792V, en la UEX:

Tabla 3.5.

Estadísticos descriptivos de operaciones con dos sistemas de medición UEX y CNH

			Estadístico	Desv. Error
Pila (CNH)	Media		,80468085	,007953676
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	,78867093	
		Límite superior	,82069077	
	Mediana		,81000000	
	Varianza		,003	
	Desv. Desviación		,054527658	
	Mínimo		,660000	
	Máximo		,930000	
Pila (UEX)	Media		,79225532	,001204550
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	,78983068	
		Límite superior	,79467995	
	Mediana		,79200000	
	Varianza		,000	
	Desv. Desviación		,008257982	
	Mínimo		,776000	
	Máximo		,807000	

Del gráfico de la figura 3.37 se observa la distribución de los voltajes respecto de sus medianas. En el mismo, se evidencia que la pila CNH presenta mayor mediana, aunque tiene varios valores outlayer (valor atípico). Por otro lado, en la pila UEX se observa un comportamiento más homogéneo entre voltajes de celdas ya que sus “brazos” de variabilidad son cortos a diferencia del largo rectángulo con brazos que presenta pila CNH:

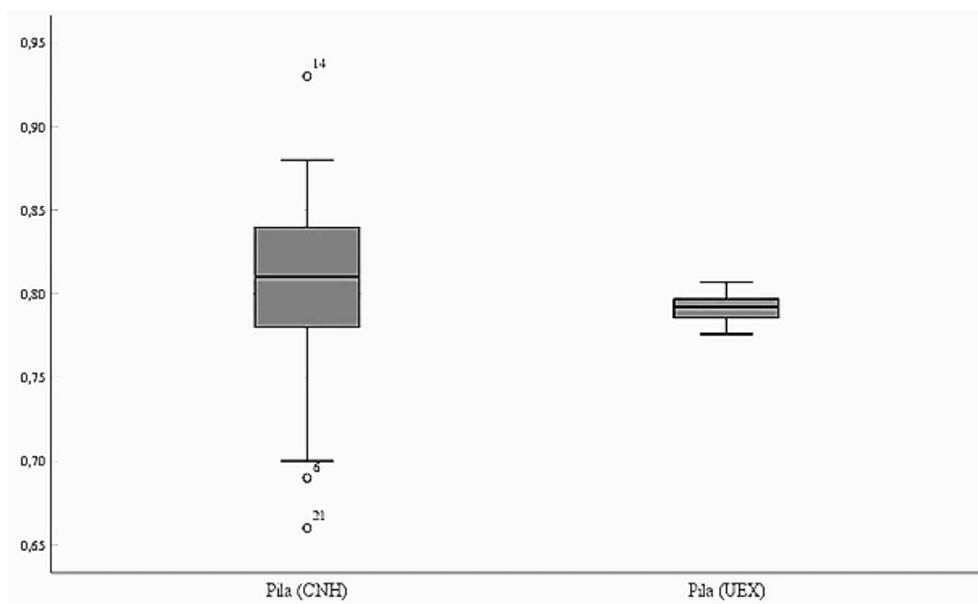


Figura 3.37. Diagrama de caja comparativo entre sistema CNH y UEX

En la prueba de inferencia estadística, se muestra que la diferencia entre las medianas de ambos sistemas no es significativa, ya que el valor de significancia es de 0.051, mayor > 0.05 que es el nivel de significancia estadística:

Tabla 3.6.

Resumen de prueba de hipótesis aplicada a la diferencia entre valores de ambos sistemas (CNH y UEX)

Hipótesis Nula	Prueba	Sig.	Decisión
1 La mediana de las diferencias entre Pila (CNH) y Pila (UEX) es igual a 0.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas	0.051	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de 0.05.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 Conclusiones de la investigación

Este trabajo se justifica en el marco del desarrollo de tecnologías de generación de energía eléctrica renovables, en especial el de las pilas de combustible, como una herramienta de caracterización y diagnóstico que sirva para investigar más a fondo el comportamiento de estos sistemas y proponer medidas para mejorar y optimizar su funcionamiento al momento de utilizarlas como fuente de energía renovable.

Se ha diseñado, configurado y construido una arquitectura de monitorización multicanal que opera en tiempo real como plataforma experimental para el seguimiento de los voltajes generados en cada una de las 47 celdas que componen el stack de una pila de combustible Ballard Nexa de 1.2kW, además de realizar mediciones de otras variables implicadas en el funcionamiento de este sistema como la corriente y temperatura a lo largo del apilamiento y celdas. Esta plataforma fue adaptada para dos sistemas de medición: el primero utilizó tres módulos de adquisición multicanales interconectados y el segundo fue adaptado para utilizar un solo un módulo en modo de medición por segmentos.

El diseño del sistema de monitorización incluye cinco elementos principales: señales de entrada, elementos de acondicionamiento y procesamiento de señales, instrumentos de medición y despliegue de datos y los instrumentos de registro gráfico. Los componentes físicos que se utilizaron para la construcción del sistema de monitorización son: equipos de adquisición de datos (DAQ NI-USB 6225, DAQ NI-USB 6008 y DAQ NI-USB 6218), pila de combustible Ballard Nexa de 1.2Kw, dos fuentes de energía EP-603, sistema de almacenamiento de hidrógeno (bombona de hidrógeno al 99,9992%) y sensores para medición de variables (corriente HTB -100 y sensores de temperatura LM-35).

Se desarrolló la programación de un software en base a instrumentos virtuales, el cual se adaptó a dos arquitecturas de medición. Este programa se utilizó como herramienta para el análisis numérico, visualización, almacenamiento y procesado de datos generados por las dos configuraciones mencionadas. Dentro de las variables generadas por esta programación se incluyen la temperatura en celdas, la temperatura del stack, la tensión e intensidad del stack, la tensión en celdas y la tensión generada por ecuación matemática.

Se diseñaron y construyeron dos tarjetas de acondicionamiento de señal conformadas por amplificadores de aislamiento ISO 124P, convertidores DC-DC aislados AS-1WR2, condensadores de desacoplo de 1 μ F (cerámicos) y 10 μ f (electrolíticos), diodo rectificador 1N4005, como elementos principales.

El prototipo desarrollado incluye un indicador en tiempo real que da seguimiento a los

voltajes de celda mínimo y máximo, monitorizando de esta manera si existe un fallo en alguna celda, lo cual se evidenciaría con un cambio abrupto del voltaje en alguna de ellas. Por otro lado, con esta herramienta se pudieron definir las celdas con mayor eficiencia de operación.

Se validaron las dos arquitecturas de medición utilizando tanque de almacenamiento de hidrógeno, fuente de energía Freak EP-603, carga eléctrica Prodigit 3260 y el software de adquisición de datos desarrollado.

Se trabajó con dos pilas de combustible Ballard Nexa de 1.2kW para verificar y validar el sistema de monitorización. Para ambas pilas y haciendo una comparación con los dos sistemas de medidas desarrollados, no se encuentran variaciones significativas en los voltajes registrados en cada una de las 47 celdas. Sin embargo, existen algunos valores outlier (atípicos), atribuibles al offset de amplificadores utilizados para adquirir las señales de tensión.

Se habilitó la toma de muestras de datos instantáneos de corriente del stack y temperatura de operación, los cuales fueron utilizados por un modelo matemático insertado en la programación para obtener de forma teórica el voltaje de la pila y de esta manera poder realizar una comparativa con el valor real adquirido mediante sensores. Los valores obtenidos en ambos casos coinciden, por lo que se puede afirmar que los datos se ajustan al modelo matemático en operación estacionaria.

Se realizó la caracterización de dos pilas de combustible Ballard Nexa de 1.2kW estudiando su comportamiento ante distintos perfiles de funcionamiento. En este sentido, fue sometida diferentes regímenes de operación y en los modos reversible (circuito abierto) e irreversible (carga externa).

Se analizó el comportamiento de la temperatura del stack en operación estacionaria y al aplicar diferentes escalones de carga. En este estudio se pone de manifiesto que existe una relación directamente proporcional entre la temperatura y la corriente del stack, lo que se evidencia con el aumento de la temperatura del stack al aumentar la corriente de la pila. Este comportamiento se debe al aumento de reacciones de óxido reducción que ocurren en cada una de las celdas que conforman el stack.

Se encontró que las temperaturas en celdas muestran variaciones en torno a un grado y menores, en los ensayos realizados tanto en celdas contiguas o en celdas equidistantes.

Los voltajes en 47 celdas para las dos pilas de combustible analizadas, en operaciones sin y con carga externa, muestran una distribución bastante simétrica según el análisis estadístico, presentando una tendencia levemente decreciente en el extremo donde se encuentra ubicado el compresor de aire. De esto se puede inferir que la distribución de los combustibles no es del todo homogénea a lo largo del stack.

Para ambas pilas de combustible estudiadas, se analizó el gráfico de voltaje versus tiempo

con el fin de utilizar la herramienta desarrollada para el diagnóstico de fallos relacionados con inconvenientes físicos como ruptura de membranas, fugas de hidrógeno o alguna operación relacionada con fatiga de la pila o envenenamientos. Con estas pruebas se concluyó que ambas pilas operaron en condiciones óptimas, ya que ninguna de las celdas reflejaba caída abrupta de tensión en los ensayos realizados.

En operación de arranque (startup), la pila demora aproximadamente 13 segundos desde el modo en operación en reposo hasta su puesta en marcha. Por otro lado, la secuencia de apagado desde el modo de operación normal hasta que se elimina la carga externa, toma un tiempo aproximado 35 a 40 segundos.

Al aplicar dos escalones de carga (5 y 10A), la respuesta del voltaje del stack y en celdas muestran picos transitorios en su gráfico correspondiente, los cuales están asociados a las velocidades en las reacciones electroquímicas que ocurren en las celdas (transporte de agua, de hidrógeno, oxígeno) y las velocidades del flujo de combustibles en canales y difusores que tienen que ajustarse rápidamente al momento de aplicar un escalón. En este tipo de operación la magnitud de los voltajes en celdas y stack es proporcional a la corriente o escalones de carga aplicada.

El gráfico de temperatura muestra una respuesta atenuada y su comportamiento responde rápidamente al incremento en la corriente demandada, a diferencia del comportamiento del voltaje. Esto es así ya que para poder hacer frente a la demanda de potencia, las reacciones dentro de cada celda aumentan y por ende ocurre aumento de las temperaturas y mejoran así su conductividad.

Al aplicar múltiples escalones de carga existe una respuesta rápida del voltaje en celdas y del stack para responder a la demanda de potencia. Adicional a esto, los picos transitorios son más evidentes a medida que aumenta la magnitud de los escalones de corriente demandada. Por otro lado se observa un pico transitorio en la etapa inicial o de arranque del sistema, el cual coincide con la operación de purga.

Durante la variación de carga sin paradas (sin realizar paradas en la carga externa para el intercambio de carga) a intervalos variables, el voltaje del stack tiene una representación atenuada en los extremos superiores de la curva. De lo cual se puede deducir que en este tipo de cambio de carga no se da un cambio abrupto en la corriente exigida por lo cual el compresor de aire ajusta su velocidad continuamente y por ende las reacciones que ocurren en las celdas no se ven drásticamente afectadas.

Se verificaron las distintas operaciones de purga del sistema con la aplicación de siete escalones de carga. Con lo cual se ha observado que la primera operación de purga se da al inicio de la puesta en marcha de la pila de combustible para permitir la distribución del hidrógeno al stack. En el modo normal de operación, la válvula de purga permanece cerrada para luego realizar

operaciones consecutivas al final de su operación y eliminar residuos de agua y gases producidos por las reacciones.

Como conclusión final del trabajo realizado, se debe señalar que se cumplió con el estudio pilas de combustible tipo PEM de 1.2Kw de la marca Ballard Nexa, utilizando una herramienta o arquitectura de monitorización multicanal que integra un software desarrollado a través de instrumentación virtual. Con esta herramienta se pudo adquirir las diferentes variables implicadas en el funcionamiento de esta pila de intercambio protónico para posteriormente ser caracterizada ante diversos perfiles de funcionamiento.

4.2 Trabajos futuros

- Realizar ensayos con el sistema de monitorización por períodos de tiempo extensos con el objetivo de verificar fallos en el funcionamiento de estas pilas de combustible ante condiciones extremas de operación integrando el regulador de la pila de combustible, inversor y una carga real AC para verificar la respuesta de las celdas ante este tipo de carga externa. Realizar un sistema de control de diferentes parámetros asociados a la operación de la pila como el de la válvula solenoide de hidrógeno, purga, velocidad del compresor y ventilador, que apoye el sistema de monitorización y que sirva para realizar las correcciones necesarias para mejorar la eficiencia en la operación de la pila de combustible.

- Extrapolar el sistema de medidas a una pila de mayor capacidad y utilizar la arquitectura desarrollada como base para realizar el modelado del voltaje del stack en modo de operación dinámico.

ANEXOS

Anexo 1. Conexión de canales físicos en DAQ NI-USB 6225

Task Name: 40 celdas

Channel Name	Physical Channel	Device Type	Measurement Type
Vc1	Dev1/ai0	USB-6225	Voltage
Vc2	Dev1/ai1	USB-6225	Voltage
Vc3	Dev1/ai2	USB-6225	Voltage
Vc4	Dev1/ai3	USB-6225	Voltage
Vc5	Dev1/ai4	USB-6225	Voltage
Vc6	Dev1/ai5	USB-6225	Voltage
Vc7	Dev1/ai6	USB-6225	Voltage
Vc8	Dev1/ai7	USB-6225	Voltage
Vc9	Dev1/ai16	USB-6225	Voltage
Vc10	Dev1/ai17	USB-6225	Voltage
Vc11	Dev1/ai18	USB-6225	Voltage
Vc12	Dev1/ai19	USB-6225	Voltage
Vc13	Dev1/ai20	USB-6225	Voltage
Vc14	Dev1/ai21	USB-6225	Voltage
Vc15	Dev1/ai22	USB-6225	Voltage
Vc16	Dev1/ai23	USB-6225	Voltage
Vc17	Dev1/ai32	USB-6225	Voltage
Vc18	Dev1/ai33	USB-6225	Voltage
Vc19	Dev1/ai34	USB-6225	Voltage
Vc20	Dev1/ai35	USB-6225	Voltage
Vc21	Dev1/ai36	USB-6225	Voltage
Vc22	Dev1/ai37	USB-6225	Voltage
Vc23	Dev1/ai38	USB-6225	Voltage
Vc24	Dev1/ai39	USB-6225	Voltage
Vc25	Dev1/ai48	USB-6225	Voltage
Vc26	Dev1/ai49	USB-6225	Voltage
Vc27	Dev1/ai50	USB-6225	Voltage

Vc28	Dev1/ai51	USB-6225	Voltage
Vc29	Dev1/ai52	USB-6225	Voltage
Vc30	Dev1/ai53	USB-6225	Voltage
Vc31	Dev1/ai54	USB-6225	Voltage
Vc32	Dev1/ai55	USB-6225	Voltage
Vc33	Dev1/ai64	USB-6225	Voltage
Vc34	Dev1/ai65	USB-6225	Voltage
Vc35	Dev1/ai66	USB-6225	Voltage
Vc36	Dev1/ai67	USB-6225	Voltage
Vc37	Dev1/ai68	USB-6225	Voltage
Vc38	Dev1/ai69	USB-6225	Voltage
Vc39	Dev1/ai70	USB-6225	Voltage
Vc40	Dev1/ai71	USB-6225	Voltage

Anexo 2. Configuración de señales de entrada a los dispositivos NI-USB6225, NI-USB 6218 y NI-USB 6008.

The screenshot shows the NI-DAQmx Task Configuration interface for a task named "7 voltajes". The left sidebar displays a tree view with "My System" expanded to "Data Neighborhood", then "NI-DAQmx Tasks", and finally "7 voltajes". The main window is divided into several sections:

- Graph:** A plot showing Amplitude vs. Time, with the Y-axis ranging from -1 to 1 and the X-axis from 0 to 200. The "Display Type" is set to "Graph" and "AutoScale Y-Axis" is checked.
- Configuration:** Contains "Channel Settings" and "Voltage Input Setup".
 - Channel Settings:** A list of virtual channels (Vc1 to Vc7) is shown. Vc1 is selected.
 - Voltage Input Setup:** Includes "Signal Input Range" (Max: 160m, Min: 0), "Scaled Units" (Volts), "Terminal Configuration" (Differential), and "Custom Scaling" (<No Scale>).
 - Timing Settings:** Acquisition Mode is "Continuous Samples", Samples to Read is 100, and Rate (Hz) is 1k.
- Help Panel:** Titled "Measuring Voltage", it provides information about DC and AC voltages and their typical applications.

The screenshot shows the NI-DAQmx Task Configuration interface for a task named "40 celdas". The left sidebar displays a tree view with "My System" expanded to "Data Neighborhood", then "NI-DAQmx Tasks", and finally "40 celdas". The main window is divided into several sections:

- Graph:** A plot showing Amplitude vs. Time, with the Y-axis ranging from -1 to 1 and the X-axis from 0 to 200. The "Display Type" is set to "Graph" and "AutoScale Y-Axis" is checked.
- Configuration:** Contains "Channel Settings" and "Voltage Input Setup".
 - Channel Settings:** A list of virtual channels (Vc1 to Vc14) is shown. Vc1 is selected.
 - Voltage Input Setup:** Includes "Signal Input Range" (Max: 160m, Min: 0), "Scaled Units" (Volts), "Terminal Configuration" (Differential), and "Custom Scaling" (<No Scale>).
 - Timing Settings:** Acquisition Mode is "Continuous Samples", Samples to Read is 100, and Rate (Hz) is 1k.
- Help Panel:** Titled "Measuring Voltage", it provides information about DC and AC voltages. A note at the bottom states: "This is the list of virtual channels. Right-click a virtual channel to change the physical channel associated with it. If an exclamation point (!) appears next to a global virtual channel, the channel has been deleted."

Temperaturas - Measurement & Automation Explorer

File Edit View Tools Operate Help

Save Run + Add Channels X Remove Channels

My System
Data Neighborhood
NI-DAQmx Tasks
7 voltajes
40 celdas
Temperaturas
Devices and Interfaces
Scales
Software
Remote Systems

Amplitude
1
0
-1
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200
Time
Graph Display Type AutoScale Y-Axis

Configuration Triggering Advanced Timing Logging

Channel Settings
Voltage
T1
T11
T23
T24
T47

Voltage Input Setup
Settings
Signal Input Range
Max 300m
Min 0
Scaled Units
Volts
Terminal Configuration
RSE
Custom Scaling
<No Scale>

Timing Settings
Acquisition Mode
Continuous Samples
Samples to Read 100
Rate (Hz) 1k

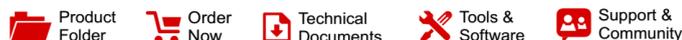
Back

Measuring Voltage
Most measurement devices are designed for measuring, or reading, voltage. Two common voltage measurements are DC and AC.
DC voltages are useful for measuring phenomena that change slowly with time, such as temperature, pressure, or strain.
AC voltages, on the other hand, are waveforms that constantly increase, decrease, and reverse polarity. Most powerlines deliver AC voltage.

This graph displays the analog signals acquired or generated by the device.

NI-DAQmx Task Connection Diagram

Anexo 3. Hoja característica de amplificador de aislamiento ISO 124P.



ISO124

SBOS074E – SEPTEMBER 1997 – REVISED JUNE 2018

ISO124 ± 10 -V Input, Precision Isolation Amplifier

1 Features

- 100% Tested for High-Voltage Breakdown
- Rated 1500 Vrms
- High IMR: 140 dB at 60 Hz
- Maximum Nonlinearity: 0.010%
- Bipolar Operation: $V_O = \pm 10$ V
- Packages: PDIP-16 and SOIC-28
- Ease of Use: Fixed Unity Gain Configuration
- Supply Range: ± 4.5 -V to ± 18 -V

2 Applications

- Industrial Process Control:
 - Transducer Isolator, Isolator for Thermocouples, RTDs, Pressure Bridges, and Flow Meters, 4-mA to 20-mA Loop Isolation
- Ground Loop Elimination
- Motor and SCR Control
- Power Monitoring
- PC-Based Data Acquisition
- Test Equipment

3 Description

The ISO124 is a precision isolation amplifier incorporating a novel duty cycle modulation-demodulation technique. The signal is transmitted digitally across a 2-pF differential capacitive barrier. With digital modulation, the barrier characteristics do not affect signal integrity, thus resulting in excellent reliability and good high-frequency transient immunity across the barrier. Both barrier capacitors are imbedded in the plastic body of the package.

The ISO124 is easy to use. No external components are required for operation. The key specifications are 0.010% maximum nonlinearity, 50-kHz signal bandwidth, and $200\text{-}\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ V_{OS} drift. A power supply range of ± 4.5 V to ± 18 V, and quiescent currents of ± 5 mA on V_{S1} and ± 5.5 mA on V_{S2} make the ISO124 device a good choice for a wide range of applications.

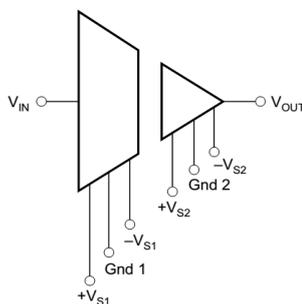
The ISO124 is available in 16-pin PDIP and 28-lead SOIC plastic surface-mount packages.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ISO124	PDIP (16)	17.90 mm \times 7.50 mm
	SOIC (28)	20.01 mm \times 6.61 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Simplified Schematic



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

ISO124

SBOS074E – SEPTEMBER 1997 – REVISED JUNE 2018

www.ti.com

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted) ⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage		±18	V
Analog input voltage, V_{IN}		100	V
Continuous isolation voltage		1500	V _{rms}
Junction temperature		125	°C
Output short to common		Continuous	
Storage temperature, T_{stg}	–40	125	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

6.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±1000	V
		Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	±500	

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
 (2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
V_{S1}	High-side analog supply voltage ($\pm V_{S1}$ to GND1)	±4.5	±15	±18	V
V_{S2}	Low-side analog supply voltage ($\pm V_{S2}$ to GND2)	±4.5	±15	±18	V
V_{IN}	Analog input voltage		±10		V
T_A	Operating temperature	–25		85	°C

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		ISO124		UNIT
		DVA (SOIC)	NVF (PDIP)	
		28 PINS	16 PINS	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance	79.8	51.0	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	32.9	32.4	°C/W
$R_{\theta JB}$	Junction-to-board thermal resistance	42.2	29.5	°C/W
ψ_{JT}	Junction-to-top characterization parameter	6.6	10.4	°C/W
ψ_{JB}	Junction-to-board characterization parameter	40.9	29.0	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the [Semiconductor and IC Package Thermal Metrics](#) application report.

6.5 Electrical Characteristics

at $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{S1} = V_{S2} = \pm 15\text{ V}$, and $R_L = 2\text{ k}\Omega$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
ISOLATION					
Rated voltage	Continuous ac 60 Hz	1500			Vac
100% test ⁽¹⁾	Test time = 1 s, partial discharge $\leq 5\text{ pC}$	2400			Vac
Isolation mode rejection	60 Hz		140		dB
Barrier impedance			$10^{14} \parallel 2$		$\Omega \parallel \text{pF}$
Leakage current at 60 Hz	$V_{\text{ISO}} = 240\text{ Vrms}$		0.18	0.5	μArms
GAIN					
Nominal gain	$V_O = \pm 10\text{ V}$		1		V/V
Gain error	$V_O = \pm 10\text{ V}$		± 0.05	± 0.50	%FSR
Gain vs temperature			± 10		ppm/ $^\circ\text{C}$
Nonlinearity ⁽²⁾			± 0.005	± 0.010	%FSR
INPUT OFFSET VOLTAGE					
Initial offset			± 20	± 50	mV
Input offset drift			± 200		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
PSR R	Power-supply rejection ratio		± 2		mV/V
	Noise		4		$\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT					
Input voltage		± 10	± 12.5		V
Resistance			200		k Ω
OUTPUT					
Output voltage		± 10	± 12.5		V
Current drive		± 5	± 15		mA
Capacitive load drive			0.1		μF
Ripple voltage ⁽³⁾			20		mVp-p
FREQUENCY RESPONSE					
Small-signal bandwidth			50		kHz
Slew rate			2		V/ μs
Settling Time 0.10%	$V_O = \pm 10\text{ V}$		50		μs
Settling Time 0.01%	$V_O = \pm 10\text{ V}$		350		μs
Overload recovery time			150		μs
POWER SUPPLIES					
I_{VS1}	High-side analog supply current		± 5.0	± 7.0	mA
I_{VS2}	Low-side analog supply current		± 5.5	± 7.0	mA

(1) Tested at 1.6x rated, fail on 5-pC partial discharge.

(2) Nonlinearity is the peak deviation of the output voltage from the best-fit straight line, and is expressed as the ratio of deviation to FSR.

(3) Ripple frequency is at carrier frequency (500 kHz).

7 Detailed Description

7.1 Overview

The ISO124 isolation amplifier uses an input and an output section galvanically isolated by matched 1-pF isolating capacitors built into the plastic package. The input is duty-cycle modulated and transmitted digitally across the barrier. The output section receives the modulated signal, converts it back to an analog voltage and removes the ripple component inherent in the demodulation. Input and output sections are fabricated, then laser trimmed for exceptional circuitry matching common to input and output sections. The sections are then mounted on opposite ends of the package with the isolating capacitors mounted between the two sections. The ISO124 contains 250 transistors.

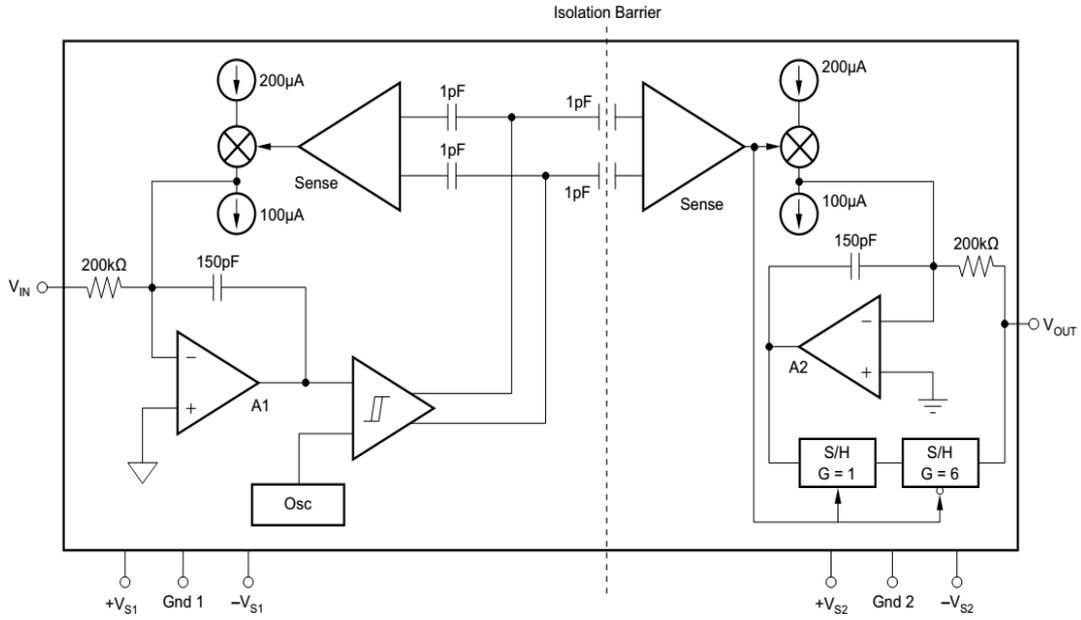
7.1.1 Modulator

An input amplifier (A1, as shown in [Functional Block Diagram](#)) integrates the difference between the input current ($V_{IN}/200\text{ k}\Omega$) and a switched $\pm 100\text{-}\mu\text{A}$ current source. This current source is implemented by a switchable $200\text{-}\mu\text{A}$ source and a fixed $100\text{-}\mu\text{A}$ current sink. To understand the basic operation of the modulator, assume that $V_{IN} = 0\text{ V}$. The integrator will ramp in one direction until the comparator threshold is exceeded. The comparator and sense amp will force the current source to switch; the resultant signal is a triangular waveform with a 50% duty cycle. The internal oscillator forces the current source to switch at 500 kHz. The resultant capacitor drive is a complementary duty-cycle modulation square wave.

7.1.2 Demodulator

The sense amplifier detects the signal transitions across the capacitive barrier and drives a switched current source into integrator A2. The output stage balances the duty-cycle modulated current against the feedback current through the $200\text{-k}\Omega$ feedback resistor, resulting in an average value at the V_{OUT} pin equal to V_{IN} . The sample-and-hold amplifiers in the output feedback loop serve to remove undesired ripple voltages inherent in the demodulation process.

7.2 Functional Block Diagram



Anexo 4. Hoja característica de Traductor de corriente HTB-100



Current Transducer HTB 50 .. 400 - P and HTB 50 .. 100 - TP

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

Primary nominal current rms I_{PN} (A)	Primary current measuring range I_{PM} (A)	Type
± 50	± 150	HTB 50-P, HTB 50-TP ¹⁾
± 100	± 300	HTB 100-P, HTB 100-TP ¹⁾
± 150	± 450	HTB 150-P
± 200	± 500	HTB 200-P
± 300	± 600	HTB 300-P
± 400	± 600	HTB 400-P

V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$) ²⁾	± 12 .. 15	V
I_C	Current consumption	± 15	mA
V_d	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5	kV
R_{IS}	Isolation resistance @ 500 VDC	> 500	MΩ
V_{OUT}	Output voltage (Analog) @ $\pm I_{PN}$, $R_L = 10k\Omega$, $T_A = 25^\circ C$	± 4	V
R_{OUT}	Output internal resistance	100	Ω
R_L	Load resistance	> 10	kΩ

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ C$ (excluding offset)	< ± 1	% of I_{PN}
ϵ_L	Linearity error ($0 \dots \pm I_{PN}$)	< ± 1	% of I_{PN}
V_{OE}	Electrical offset voltage @ $T_A = 25^\circ C$	< ± 30	mV
V_{OH}	Hysteresis offset voltage @ $I_p = 0$; after an excursion of $1 \times I_{PN}$	< ± 1	% of I_{PN}
TCV_{OE}	Temperature coefficient of V_{OE}	HTB 50-(T)P < ± 2.0 HTB 100-(T)P .. 400-P < ± 1.0	mV/K
TCV_{OUT}	Temperature coefficient of V_{OUT} (% of reading)	< ± 0.1	%/K
t_r	Response time to 90% of I_{PN} step	< 3	μs
BW	Frequency bandwidth (-3 dB) ³⁾	DC .. 50	kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	- 40 .. + 80	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 40 .. + 85	°C
m	Mass	< 30 (< 36)	g
	Standards	EN 50178 : 1997	
	2 pins of Ø2mm diameter are available on transducer for PCB soldering		

Notes : ¹⁾ -TP version is equipped with a primary bus bar.
²⁾ Operating at $\pm 12V \leq V_C < \pm 15V$ will reduce the measuring range.
³⁾ Derating is needed to avoid excessive core heating at high frequency.

$I_{PN} = 50 \dots 400$ A



Features

- Hall effect measuring principle
- Galvanic isolation between primary and secondary circuit
- Isolation voltage 2500 V
- Low power consumption
- Wide power supply: $\pm 12 \dots 15$ V
- Primary bus bar option for 50 A and 100 A version for ease of connection

Advantages

- Small size and space saving
- Only one design for wide current ratings range
- High immunity to external interference.

Applications

- AC variable speed drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications

Application domain

- Industrial

Current Transducer HTB 50 .. 400-P and HTB 50 .. 100-TP

Isolation characteristics

V_d	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5	kV
V_e	Partial discharge extinction voltage rms @ 10pC	> 500	V
V_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	4	kV
dCp	Creepage distance	> 4.5	mm
dCl	Clearance distance	> 4.5	mm
CTI	Comparative tracking index (Group IIIa)	275	

Application examples

According to EN 50178 and CEI 61010-1 standards and following conditions :

- Over voltage category III
- Pollution degree 2
- Heterogeneous field

	EN 50178	IEC 61010-1
Single isolation	300 V	300 V
Reinforced isolation	150 V	150 V

Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.

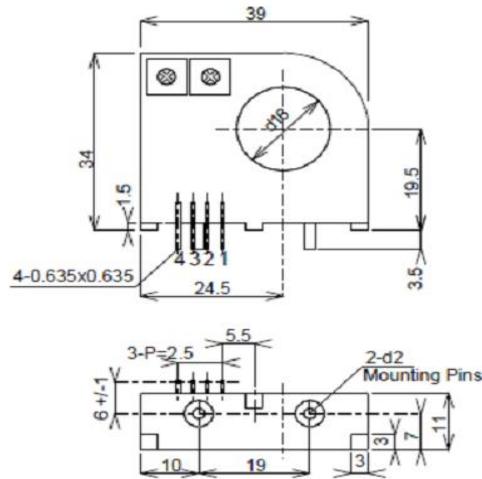
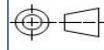


Caution, risk of electrical shock

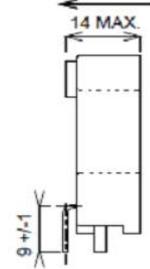
When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply). Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage. This transducer is a built-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation. A protective housing or additional shield could be used. Main supply must be able to be disconnected.

Dimensions HTB 50 .. 400-P and HTB 50 .. 100-TP (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)

HTB 50..400-P



Positive Current Flow

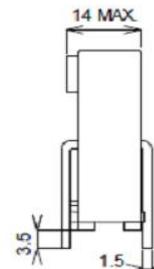
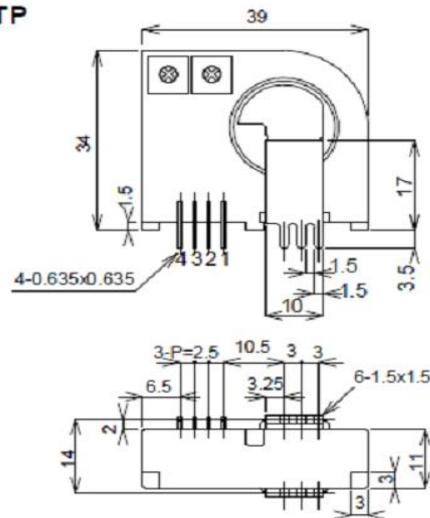
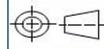


Secondary Pin Identification

- 1 +Vc
- 2 -Vc
- 3 Output
- 4 0V

General tolerance: ± 0.5 mm

HTB 50..100-TP



Positive Current Flow

Secondary Pin Identification

- 1 +Vc
- 2 -Vc
- 3 Output
- 4 0V

General tolerance: ± 0.5 mm

Anexo 5. Hoja característica de convertidor DC/DC A_S-1WR1

DC/DC Converter A_S-1WR2 & B_LS-1WR2 Series

MORNSUN®

1W, Fixed input voltage, isolated & unregulated dual/single output



UL US CE Patent Protection RoHS

FEATURES

- Ultra Compact SIP package
- Operating temperature range: -40°C to +105°C
- High efficiency up to 80%
- Isolation voltage: 1.5K VDC
- High power density
- No external component required
- International standard pin-out
- UL60950, EN60950 approval

A_S-1WR2 & B_LS-1WR2 series is specially designed for applications where an isolated voltage is required in a distributed power supply system. It is suitable for:

1. Where the voltage of the input power supply is stable (voltage variation: $\pm 10\%V_{in}$);
2. Where isolation is necessary between input and output (isolation voltage $\leq 1500VDC$);
3. Where do not has high requirement of line regulation and load regulation;
Such as: pure digital circuits, low frequency analog circuits, relay-driven circuits and data switching circuits.

Selection Guide

Certification	Part No.	Input Voltage (VDC)	Output		Efficiency (%Min./Typ.) @ Full Load	Max. Capacitive Load*(μF)		
		Nominal (Range)	Output Voltage (VDC)	Output Current (mA)(Max./Min.)				
--	A0315S-1WR2	3.3 (2.97-3.63)	± 15	$\pm 34/\pm 4$	72/76	100		
	B0303LS-1WR2		3.3	303/31	68/72			
	B0305LS-1WR2		5	200/20	74/78			
UL/CE	A0503S-1WR2	5 (4.5-5.5)	± 3.3	$\pm 152/\pm 15$	67/71	100		
	A0505S-1WR2		± 5	$\pm 100/\pm 10$	76/80			
	A0509S-1WR2		± 9	$\pm 56/\pm 6$	76/80			
	A0512S-1WR2		± 12	$\pm 42/\pm 5$	76/80			
	A0515S-1WR2		± 15	$\pm 34/\pm 4$	76/80			
	A0524S-1WR2		± 24	$\pm 21/\pm 3$	76/80			
--	B0503LS-1WR2	5 (4.5-5.5)	3.3	303/31	70/74	220		
	B0505LS-1WR2		5	200/20	76/80			
	B0509LS-1WR2		9	111/11	76/80			
	B0512LS-1WR2		12	84/9	76/80			
	B0515LS-1WR2		15	67/7	76/80			
UL/CE	B0524LS-1WR2	5 (4.5-5.5)	24	42/5	76/80	220		
	A0909S-1WR2		9 (8.1-9.9)	± 9	$\pm 56/\pm 6$		76/80	
	A0915S-1WR2			± 15	$\pm 34/\pm 4$		76/80	
	A1203S-1WR2			± 3.3	$\pm 152/\pm 15$		72/76	
	A1205S-1WR2			± 5	$\pm 100/\pm 10$		76/80	
A1209S-1WR2	± 9	$\pm 56/\pm 6$		76/80				
UL/CE	A1212S-1WR2	12 (10.8-13.2)	± 12	$\pm 42/\pm 5$	76/80	100		
	A1215S-1WR2		± 15	$\pm 34/\pm 4$	76/80			
	A1224S-1WR2		± 24	$\pm 21/\pm 3$	76/80			
	B1203LS-1WR2		12 (10.8-13.2)	3.3	303/31		72/76	220
	B1205LS-1WR2			5	200/20		76/80	
B1209LS-1WR2	9	111/11		76/80				
B1212LS-1WR2	12	84/9		76/80				

MORNSUN®

MORNSUN GUANGZHOU SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD.

2018.04.13-B/4 Page 1 of 5

MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd. reserves the copyright and right of final interpretation

2. EMC typical recommended circuit (CLASS B)

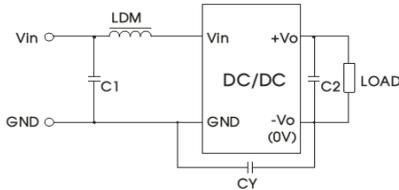


Fig. 4

Input voltage (VDC)	3.3/5/9/12	15/24
EMI	C1	4.7μF /50V
	C2	Refer to the Cout in Fig.3
	CY	1nF/2KV
	LDM	6.8μH

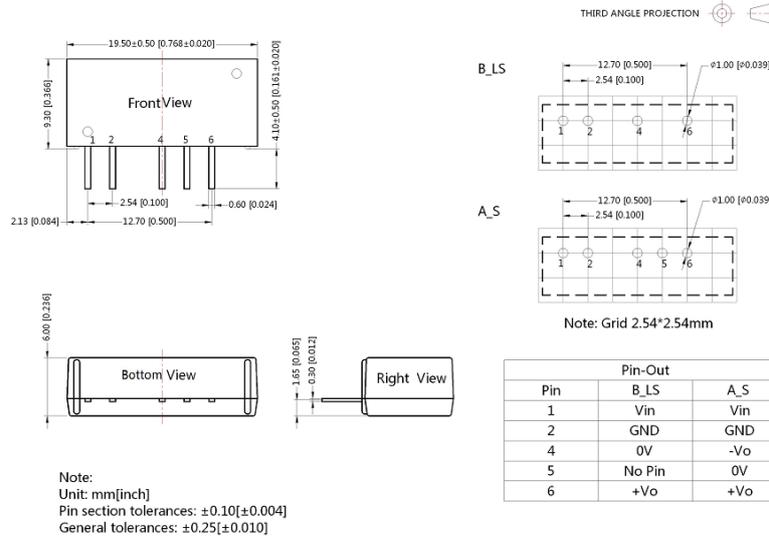
Note: 1. 1.15V/ 24V input series is subject to CY (CY : 1nF/2KV).
2. It is not needed to add the component in the peripheral circuit when parameter with the symbol of "-".

3. Output load requirements

In order to ensure the converter can work reliably with high efficiency, the minimum load should not less than 10% rated load when it is used. If the needed power is indeed small, please parallel a resistor on the output side (The sum of the efficient power and resistor consumption power is not less than 10%).

4. For more information please find the application notes on www.mornsun-power.com

Dimensions and Recommended Layout



Note:

1. Packing information please refer to Product Packing Information which can be downloaded from www.mornsun-power.com. Packing bag number: 58200029;
2. If the product is not operated within the required load range, the product performance cannot be guaranteed to comply with all parameters in the datasheet;
3. The maximum capacitive load offered were tested at input voltage range and full load;
4. Unless otherwise specified, parameters in this datasheet were measured under the conditions of Ta=25°C, humidity<75%RH with nominal input voltage and rated output load;
5. All index testing methods in this datasheet are based on our Company's corporate standards;
6. We can provide product customization service, please contact our technicians directly for specific information;
7. Specifications are subject to change without prior notice.

MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd.

Address: No. 5, Kehui St. 1, Kehui Development Center, Science Ave., Guangzhou Science City, Luogang District, Guangzhou, P. R. China
Tel: 86-20-38601850-8801 Fax: 86-20-38601272 E-mail: info@mornsun.cn

Anexo 6. Hoja característica de sensor de temperatura LM35



LM35

www.ti.com

SNIS159D –AUGUST 1999–REVISED OCTOBER 2013

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

FEATURES

- **Calibrated Directly in ° Celsius (Centigrade)**
- **Linear + 10 mV/°C Scale Factor**
- **0.5°C Ensured Accuracy (at +25°C)**
- **Rated for Full –55°C to +150°C Range**
- **Suitable for Remote Applications**
- **Low Cost Due to Wafer-Level Trimming**
- **Operates from 4 to 30 V**
- **Less than 60-μA Current Drain**
- **Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air**
- **Nonlinearity Only ±¼°C Typical**
- **Low Impedance Output, 0.1 Ω for 1 mA Load**

DESCRIPTION

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, with an output voltage linearly proportional to the Centigrade temperature. Thus the LM35 has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±¼°C at room temperature and ±¾°C over a full –55°C to +150°C temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 make interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 draws only 60 μA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a –55°C to +150°C temperature range, while the LM35C is rated for a –40°C to +110°C range (–10° with improved accuracy). The LM35 series is available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

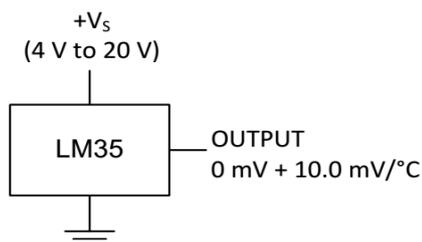
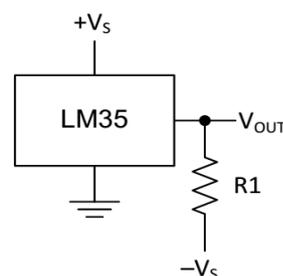


Figure 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = 1500 \text{ mV at } 150^\circ\text{C}$
 $V_{\text{OUT}} = 250 \text{ mV at } 25^\circ\text{C}$
 $V_{\text{OUT}} = -550 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$

Figure 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

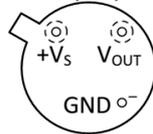
Copyright © 1999–2013, Texas Instruments Incorporated



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

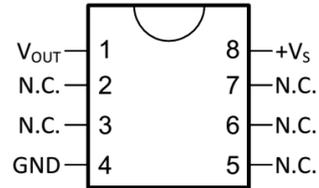
CONNECTION DIAGRAMS

**METAL CAN PACKAGE
TO (NDV)**



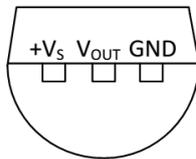
Case is connected to negative pin (GND)

**SMALL-OUTLINE MOLDED PACKAGE
SOIC-8 (D)
TOP VIEW**

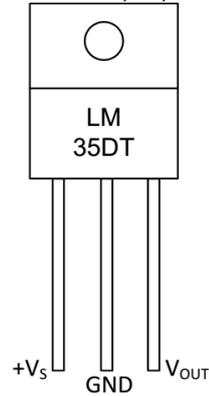


N.C. = No connection

**PLASTIC PACKAGE
TO-92 (LP)
BOTTOM VIEW**



**PLASTIC PACKAGE
TO-220 (NEB)**



Tab is connected to the negative pin (GND).

NOTE: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾⁽²⁾

		MIN	MAX	UNIT	
Supply voltage		-0.2	35	V	
Output voltage		-1	6	V	
Output current			10	mA	
Electrostatic discharge (ESD) susceptibility ⁽³⁾			2500	V	
Storage temperature	TO Package	-60	180	°C	
	TO-92 Package	-60	150		
	TO-220 Package	-65	150		
	SOIC-8 Package	-65	150		
Lead temperature	TO Package (soldering, 10 seconds)		300	°C	
	TO-92 and TO-220 Package (soldering, 10 seconds)		260		
	SOIC Package	Infrared (15 seconds)	220		
		Vapor phase (60 seconds)	215		
Specified operating temperature range: T_{MIN} to T_{MAX} ⁽⁴⁾	LM35, LM35A		-55	150	°C
	LM35C, LM35CA		-40	110	
	LM35D		0	100	

- (1) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (2) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See [Note 1](#).
- (3) Human body model, 100 pF discharged through a 1.5-kΩ resistor.
- (4) Thermal resistance of the TO-46 package is 400°C/W, junction to ambient, and 24°C/W junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is 180°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is 220°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is 90°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the [APPLICATIONS](#) section.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35A			LM35CA			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Accuracy ⁽⁵⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	±0.2	±0.5		±0.2	±0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	±0.3			±0.3		±1	
	$T_A = T_{MAX}$	±0.4	±1		±0.4	±1		
	$T_A = T_{MIN}$	±0.4	±1		±0.4		±1.5	
Nonlinearity ⁽⁶⁾	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	±0.18		±0.35	±0.15		±0.3	°C
Sensor gain (average slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10	+9.9, +10.1		+10		+9.9, +10.1	mV/°C
Load regulation ⁽⁷⁾ $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	±0.4	±1		±0.4	±1		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	±0.5		±3	±0.5		±3	
Line regulation ⁽⁷⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	±0.01	±0.05		±0.01	±0.05		mV/V
	$4 \text{ V} \leq V_S \leq 30 \text{ V}$	±0.02		±0.1	±0.02		±0.1	

- (1) Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq 150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = 5 \text{ Vdc}$ and $I_{LOAD} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of [Figure 2](#). These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of [Figure 1](#). Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.
- (2) Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.
- (3) Tested Limits are ensured and 100% tested in production.
- (4) Design Limits are ensured (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.
- (5) Accuracy is defined as the error between the output voltage and 10 mV/°C times the case temperature of the device, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in °C).
- (6) Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the rated temperature range of the device.
- (7) Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾ (continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35A			LM35CA			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Quiescent current ⁽⁸⁾	$V_S = 5\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = 5\text{ V}$	105		131	91		114	
	$V_S = 30\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		
	$V_S = 30\text{ V}$	105.5		133	91.5		116	
Change of quiescent current ⁽⁷⁾	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}, 25^\circ\text{C}$	0.2	1		0.2	1		μA
	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$	0.5		2	0.5		2	
Temperature coefficient of quiescent current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum temperature for rate accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	+1.5		+2	+1.5		+2	$^\circ\text{C}$
Long term stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

(8) Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35			LM35C, LM35D			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Accuracy, LM35, LM35C ⁽⁵⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1		± 0.4	± 1		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2	
Accuracy, LM35D ⁽⁵⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2	
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2	
Nonlinearity ⁽⁶⁾	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor gain (average slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	+10	+9.8, +10.2		+10		+9.8, +10.2	$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Load regulation ⁽⁷⁾ $0 \leq I_L \leq 1\text{ mA}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2		± 0.4	± 2		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5	± 0.5		± 5	
Line regulation ⁽⁷⁾	$T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	

(1) Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq 150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = 5\text{ Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}} = 50\ \mu\text{A}$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of Figure 1. Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.

(2) Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.

(3) Tested Limits are ensured and 100% tested in production.

(4) Design Limits are ensured (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

(5) Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$ times the case temperature of the device, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

(6) Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the rated temperature range of the device.

(7) Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾ (continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM35			LM35C, LM35D			UNITS (MAX.)
		TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	TYP	TESTED LIMIT ⁽³⁾	DESIGN LIMIT ⁽⁴⁾	
Quiescent current ⁽⁸⁾	$V_S = 5\text{ V}$, 25°C	56	80		56	80		μA
	$V_S = 5\text{ V}$	105		158	91		138	
	$V_S = 30\text{ V}$, 25°C	56.2	82		56.2	82		
	$V_S = 30\text{ V}$	105.5		161	91.5		141	
Change of quiescent current ⁽⁹⁾	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$, 25°C	0.2	2		0.2	2		μA
	$4\text{ V} \leq V_S \leq 30\text{ V}$	0.5		3	0.5		3	
Temperature coefficient of quiescent current		+0.39		+0.7	+0.39		+0.7	μA/°C
Minimum temperature for rate accuracy	In circuit of Figure 1 , $I_L = 0$	+1.5		+2	+1.5		+2	°C
Long term stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	±0.08			±0.08			°C

(8) Quiescent current is defined in the circuit of [Figure 1](#).

(9) Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Anexo 7. Hoja característica de regulador de presión de la pila de combustible Nexa 1.2kW

Instruction Manual
Form 5124

912N Series

June 2010

912N Series Pressure Regulators

WARNING

To avoid injury or equipment damage, these regulators should be installed, operated, and maintained in accordance with federal, state and local codes, rules and regulations, and Emerson Process Management Regulator Technologies, Inc. instructions.

Only a qualified person must install or service a regulator. Be certain the control spring range label is updated to accurately indicate any field changes in equipment, materials, service conditions, or pressure settings.

Immediately call a qualified technician in case of trouble. If venting occurs, or a leak develops in the system, it indicates that service is required. Failure to correct the situation immediately may create a hazardous condition.

Introduction

Scope of the Manual

This manual provides installation, maintenance, and parts information for the 912N Series pressure regulators (Figure 1) as used in industrial/natural gas applications.

Description

The 912N Series pressure regulators are direct-operated, spring-loaded devices built to provide accurate, sensitive control suited to a variety of applications.

As outlet pressure begins to exceed the set pressure, the diaphragm inside the regulator lifts, operating a lever to close the inlet. Pressure in excess of the relief valve spring force opens the relief valve, allowing excess pressure to bleed through the screened vent in the spring case.

Specifications

Specifications for the 912N Series regulators are given on page 2.



P1024

Figure 1. Type 912N Regulator

Installation

WARNING

Personal injury or equipment damage may result if the regulator is installed where service conditions could exceed the pressure or temperature specifications in Specifications section. The regulator must not be used for hazardous gas service in a closed area unless the vent is piped to a safe area. The vent opening on the regulator or the opening on the remote vent pipe (if one is used) should be pointed down to minimize clogging from collected moisture, corrosive chemicals, and other foreign material. Overpressuring the downstream system (and risk of explosion) could result from a clogged vent.

Overpressuring any portion of a regulator or associated equipment may cause leakage, part damage, or personal injury due to bursting of pressure-containing parts or explosion of accumulated gas.

Like most regulators, the 912N Series regulators have an outlet pressure rating lower than the inlet pressure rating. Downstream protection is required if the actual inlet pressure can exceed the regulator outlet pressure rating or the pressure rating of any downstream equipment.

FISHER

www.fisherregulators.com


EMERSON
Process Management

D100317X012

912N Series

Specifications

<p>Available Configuration See Table 1</p> <p>Body Sizes and End Connection Styles Inlet: 1/4 NPT Outlet: 1/4 or 3/8 NPT</p> <p>Maximum Allowable Inlet Pressure⁽¹⁾ 250 psig (17,2 bar)</p> <p>Outlet Pressure Ranges⁽¹⁾ See Table 1</p> <p>Maximum Allowable Outlet Pressure⁽¹⁾ Emergency Outlet Pressure: 20 psig (1,4 bar)</p> <p>Recommended Outlet Pressure to Avoid Internal Part Damage: 3 psi (0,21 bar differential) above outlet pressure setting; provide external relief if start-to-discharge point exceeds 3 psid (0,21 bar differential) (see Table 1)</p>	<p>Internal Relief Performance Approximate Internal Relief Valve Start-to-Discharge Point: See Table 1</p> <p>Capacity: Adequate only for relieving minor build-up situations such as caused by chips or dirt blocking the seat partly open; for major malfunctions, external relief is required according to the Installation section.</p> <p>Temperature Capabilities -20° to 160°F (-29° to 71°C)</p> <p>Pressure Registration Internal</p> <p>Vent Size 1/8 NPT tapped with removable screen</p> <p>Approximate Weight 1.3 pounds (0,6 kg)</p>
---	---

1. The pressure/temperature limits in this Instruction Manual or any applicable standard limitation should not be exceeded.

Table 1. Outlet Pressure Range Data

AVAILABLE CONFIGURATION	OUTLET PRESSURE RANGE	APPROXIMATE POINT ABOVE OUTLET PRESSURE SETTING AT WHICH INTERNAL RELIEF STARTS TO DISCHARGE	CONTROL SPRING SELECTION	
			Part Number	Color Code
912N Series without handwheel	3 to 7-inches w.c. (7 to 17 mbar)	5 to 21-inches w.c. (12 to 52 mbar)	1B784327222	Red
	5 to 10-inches w.c. (12 to 25 mbar)	8 to 30-inches w.c. (20 to 75 mbar)	1B784427222	Orange
	9.25 to 13-inches w.c. (23 to 32 mbar)	16 to 39-inches w.c. (40 to 97 mbar)	1L507937022	Unpainted
912N Series with handwheel	12 to 24-inches w.c. (30 to 60 mbar)	17-inches w.c. to 3 psig (42 mbar to 0,21 bar)	1B784527222	Blue
	0.5 to 2.7 psig (0,03 to 0,18 bar)	0.70 to 6.80 psig (0,05 to 0,47 bar) ⁽¹⁾	1B784627222	Yellow
	2.7 to 5 psig (0,18 to 0,34 bar)	3.80 to 12.5 psig (0,26 to 0,86 bar) ⁽¹⁾	1B784727222	Green
	8 to 24-inches w.c. (20 to 60 mbar)	30.3 to 35.4-inches w.c. (75 to 88 mbar)	1B784527222	Blue
	2.7 to 5 psig (0,18 to 0,34 bar)	5.4 to 6.7 psig (0,37 to 0,46 bar) ⁽¹⁾	1B784727222	Green

1. Internal Relief Performance is only adequate for relieving minor build-up situations. External relief is required if start-to-discharge point exceeds 3 psid (0,21 bar differential).

Regulator operation within ratings does not preclude the possibility of damage from external sources or from debris in the lines. A regulator should be inspected for damage periodically and after any overpressure condition.

Ensure that the regulator is undamaged and contains no foreign material. Install the regulator so that the flow through it leaves the outlet port (marked on the body). The regulator may be installed in any position. However, the spring case vent should be pointed down. Spring case/vent orientation can be changed by rotating the spring case with respect to the body.

For an indoor installation, if the regulator controls a gas that is flammable or otherwise hazardous, a spring case with the standard vent line should be used so that the exhaust can be piped away. Provide protection on a remote vent by installing a screened vent cap into the remote end of the vent pipe. The vent should be pointed down.

Apply a good grade of pipe compound to the pipe threads before making the connections. Install piping into the 1/4 NPT inlet connection and the 1/4 or 3/8 NPT outlet connection.

Each regulator is factory-set for the pressure setting specified on the order. If no setting was specified, the outlet

pressure is factory-set at the mid-range of the control spring. The procedure for adjusting the output pressure is given in the Startup section.

Startup

Key numbers are referenced in Figure 2.

With installation completed and downstream equipment properly adjusted, slowly open the upstream and downstream shut-off valves while monitoring the regulator output pressure.



WARNING

For the 912N Series construction with no drive screw in the spring case, never adjust the control spring to produce an outlet pressure higher than the outlet pressure range for that particular spring. Doing so could overpressure the system and cause personal injury or equipment damage. If the desired outlet pressure is not within the range of the control spring, install a spring of the proper range according to the Maintenance section.

If outlet pressure adjustment is necessary, monitor the outlet pressure with a gauge while performing the following procedures:

1. For units without a handwheel, unscrew the closing cap (key 3) and insert a screw driver blade into the adjusting screw (key 4).
2. Slowly turn the adjusting screw or handwheel clockwise to increase or counterclockwise to decrease the output pressure setting.
3. With the output pressure adjusted to the desired value, replace the closing cap on units without a handwheel.

Shutdown

Close the nearest upstream shut-off valve, then close the nearest downstream shut-off valve, and vent pressure from the outlet of the regulator.

Maintenance

Regulator parts are subject to normal wear and must be inspected and replaced as necessary. The frequency of inspection and replacement of parts depends on the severity of service conditions or the requirements of local, state, and federal rules and regulations.

WARNING

To avoid personal injury or equipment damage, do not attempt any maintenance or disassembly without first isolating the regulator from system pressure and relieving all internal pressure from the regulator.

This procedure is to be performed if changing the control spring for one of a different range, or for inspecting, cleaning, or replacing any other parts. Key numbers are referenced in Figures 2 and 3.

Note

If sufficient clearance exists, the regulator body (key 1) can remain in the line during spring replacement or other maintenance procedures.

Control Spring Replacement

Refer to Figure 2 on units without the handwheel, unscrew the closing cap (key 3) and turn the adjusting screw out of the spring case. Lift out the control spring (key 5).

Refer to Figure 3 on units with a handwheel (key 4), turn the handwheel counterclockwise until the tension is relieved from the control spring (key 5). Unscrew the nut at the base of the handwheel and lift the handwheel off the spring case (key 2). Lift out the adjusting screw (key 4) and the control spring.

Replace the control spring and complete the assembly by replacing the adjusting screw and the closing cap or handwheel. Adjust the spring tension as described in the Startup section.

Diaphragm and Relief Valve Replacement

Remove cap screws (key 14) and separate the spring case from the valve body. Remove the control spring (key 5) and the diaphragm (key 15) along with the diaphragm head (key 10), the relief valve seat (key 9) and the relief valve spring (key 6). Separate these parts by removing the pin (key 8) and the spring seat (key 7).

To reassemble the regulator, first assemble the relief valve spring assembly, then replace the relief valve spring assembly, the diaphragm, the diaphragm head, and fit the spring case to the body. Install and tighten cap screws (key 14) in a crisscross manner. Adjust the control spring tension as described in the Startup section.

Parts Ordering

When corresponding with the local Sales Office about this regulator, include the type number, date of manufacture, and all other pertinent information from the labels. Specify the eleven-character part number when ordering new parts from the following parts list.

Parts List

Key	Description	Part Number
1	Body, Zinc 1/4 x 1/4 NPT 0.073-inch (1,9 mm) port diameter	3D377144042
	1/4 x 3/8 NPT 0.073-inch (1,9 mm) port diameter	3B782444042
	1/4 x 1/4 NPT 0.094-inch (2,4 mm) port diameter	T4000544042
	1/4 x 3/8 NPT 0.094-inch (2,4 mm) port diameter	3B892744042
2	Spring Case	3E294444042
3	Closing Cap 912N Series with handwheel, Brass	1C234414012
	All others, Plastic	T13269T0012
4	Adjusting Screw 912N Series with handwheel, Zinc/Steel	14B7140X022
	All others, Plastic	T1027706992
5	Regulator Spring, Steel	See Table 1
6	Relief Valve Spring, Steel	1B784827012
7	Spring Seat, Steel	1B783425072
8	Pin, 302 Stainless steel	1B783535032
9	Relief Valve Seat, Zinc pusher (relieve valve post)	2B783044012
10	Diaphragm Plate, Zinc-plated Steel	1B783824132
11	Disc Holder	GE19397X012
12	Fulcrum Rod, 302 Stainless steel	0U091435032
13	Machine Screw, Steel (2 required)	T12748T0012
14	Machine Screw, Steel (6 required)	1V4131X0012
15	Diaphragm, Nitrile (NBR) Spring Range: 3 to 24-inches w.c. (7 to 60 mbar)	1B7837T0022
	Spring Range: 0.5 to 5 psi (0,03 to 0,34 bar)	1B783702012
16	Vent Screen, 304 Stainless steel	0W086343062

912N Series

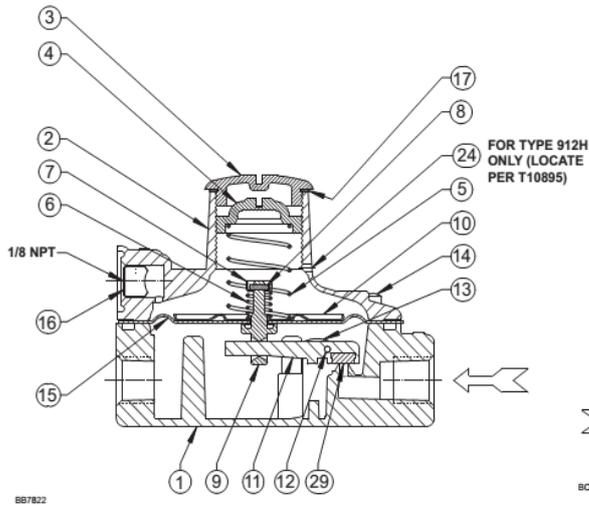


Figure 2. 912N Series Pressure Regulator Assembly

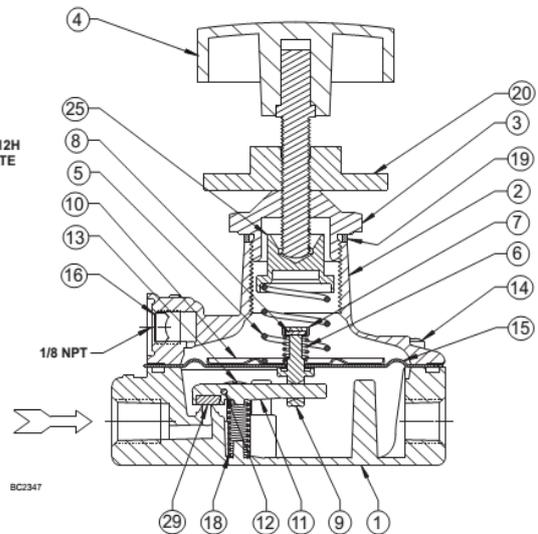


Figure 3. 912N Series with Handwheel Construction Assembly

Key	Description	Part Number	Key	Description	Part Number
17*	Closing Cap Gasket, Composition	1E765204022	20	Lockwheel, Brass, 912N Series with handwheel only	1C234614012
18	Closing Spring, 302 Stainless steel, 912N Series with handwheel only	1E302037022	25	Spring Seat, Brass, 912N Series with handwheel only	1C234514012
19	Spacer Ring, Brass, 912N Series with handwheel only	1C580714012	29*	Disc	GE12677T012

*Recommended spare part

Industrial Regulators

Emerson Process Management Regulator Technologies, Inc.

USA - Headquarters
McKinney, Texas 75069-1872 USA
Tel: 1-800-558-5853
Outside U.S. 1-972-548-3574

Asia-Pacific
Shanghai, China 201206
Tel: +86 21 2892 9000

Europe
Bologna, Italy 40013
Tel: +39 051 4190611

Middle East and Africa
Dubai, United Arab Emirates
Tel: +971 4811 8100

Natural Gas Technologies

Emerson Process Management Regulator Technologies, Inc.

USA - Headquarters
McKinney, Texas 75069-1872 USA
Tel: 1-800-558-5853
Outside U.S. 1-972-548-3574

Asia-Pacific
Singapore, Singapore 128461
Tel: +65 6777 8211

Europe
Bologna, Italy 40013
Tel: +39 051 4190611
Gallardon, France 28320
Tel: +33 (0)2 37 33 47 00

TESCOM

Emerson Process Management Tescom Corporation

USA - Headquarters
Elk River, Minnesota 55330-2445 USA
Tel: 1-763-241-3238

Europe
Selmsdorf, Germany 23923
Tel: +49 (0) 38823 31 0

For further information visit www.fisherregulators.com

The Emerson logo is a trademark and service mark of Emerson Electric Co. All other marks are the property of their prospective owners. Fisher is a mark owned by Fisher Controls, Inc., a business of Emerson Process Management.

The contents of this publication are presented for informational purposes only, and while every effort has been made to ensure their accuracy, they are not to be construed as warranties or guarantees, express or implied, regarding the products or services described herein or their use or applicability. We reserve the right to modify or improve the designs or specifications of such products at any time without notice.

Emerson Process Management does not assume responsibility for the selection, use or maintenance of any product. Responsibility for proper selection, use and maintenance of any Emerson Process Management product remains solely with the purchaser.

Anexo 8. Hoja característica de diodo rectificador 1N4005

**1N4001, 1N4002, 1N4003,
1N4004, 1N4005, 1N4006,
1N4007**

Axial-Lead Glass Passivated Standard Recovery Rectifiers

This data sheet provides information on subminiature size, axial lead mounted rectifiers for general-purpose low-power applications.

Features

- Shipped in Plastic Bags, 1000 per bag
- Available Tape and Reeled, 5000 per reel, by adding a “RL” suffix to the part number
- Available in Fan-Fold Packaging, 3000 per box, by adding a “FF” suffix to the part number
- Pb-Free Packages are Available

Mechanical Characteristics

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 0.4 gram (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds, 1/16 in. from case
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

www.onsemi.com

LEAD MOUNTED RECTIFIERS 50–1000 VOLTS DIFFUSED JUNCTION



**CASE 59–10
AXIAL LEAD
PLASTIC**

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location
1N400x = Device Number
x = 1, 2, 3, 4, 5, 6 or 7
YY = Year
WW = Work Week
▪ = Pb-Free Package
(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 5 of this data sheet.

1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
†Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
†Non-Repetitive Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	V_{RSM}	60	120	240	480	720	1000	1200	V
†RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
†Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60 Hz, $T_A = 75^\circ\text{C}$)	I_O	1.0							A
†Non-Repetitive Peak Surge Current (surge applied at rated load conditions)	I_{FSM}	30 (for 1 cycle)							A
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J T_{stg}	-65 to +175							$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

†Indicates JEDEC Registered Data

THERMAL CHARACTERISTICS

Rating	Symbol	Max	Unit
Maximum Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	Note 1	$^\circ\text{C}/\text{W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS†

Rating	Symbol	Typ	Max	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop, ($I_F = 1.0$ Amp, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	v_F	0.93	1.1	V
Maximum Full-Cycle Average Forward Voltage Drop, ($I_O = 1.0$ Amp, $T_L = 75^\circ\text{C}$, 1 inch leads)	$V_{F(AV)}$	–	0.8	V
Maximum Reverse Current (rated DC voltage) ($T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J = 100^\circ\text{C}$)	I_R	0.05 1.0	10 50	μA
Maximum Full-Cycle Average Reverse Current, ($I_O = 1.0$ Amp, $T_L = 75^\circ\text{C}$, 1 inch leads)	$I_{R(AV)}$	–	30	μA

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

†Indicates JEDEC Registered Data

1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007

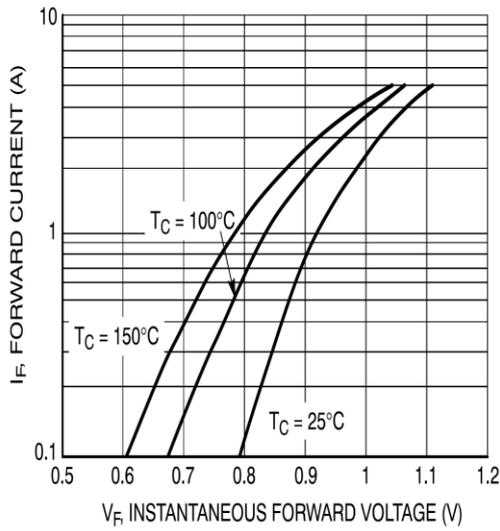


Figure 1. Typical Forward Voltage

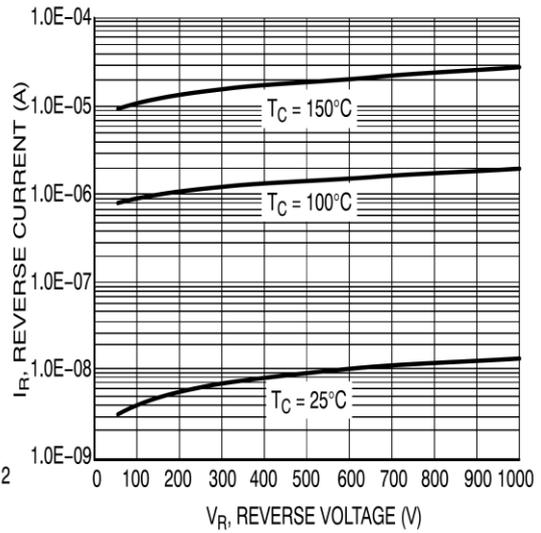


Figure 2. Typical Reverse Current

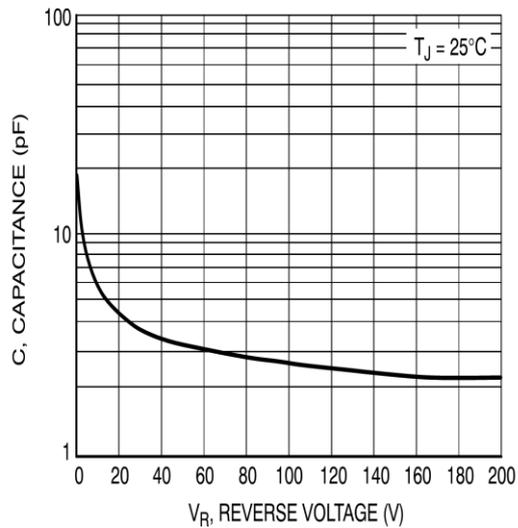


Figure 3. Typical Capacitance

Lista de referencias

- Adsorción física de gases. (2013). Recuperado de <http://www.labte.es/index.php/es/2013-11-03-19-54-23/propiedades-texturales/adsorcion-fisica-de-gases>.
- Agila, E. W., & Huilcapi, V. M. (2014). Lógica borrosa para la estimación de estados críticos de una pila de combustible PEM. *Maskana*, 5, 13-22. Recuperado de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/533>
- Aguirre, A. S. (2015). *Modelado y validación experimental de una monocelda y un stack de una pila de combustible tipo PEM* (Tesis doctoral, Universidad de Sevilla). Recuperada de <http://hdl.handle.net/11441/33536>
- Almarza, J. (2010). *Diseño y fabricación de una pila de combustible de hidrógeno de baja potencia* (Tesis de grado, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperada de <http://hdl.handle.net/2099.1/8939>
- Alrwashdeh, S., Manke, I., Markötter, H., Haußmann, J., Kardjilov, N., Hilger, A, Kermani, M, . . . Banhart, J. (2017). Neutron radiographic in operando investigation of water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells with channel barriers. *Energy Conversion and Management*, 148, 604-610. doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.032
- Andujar, J. M., & Segura, F. (2015). PEFC simulator and real time monitoring system. *Fuel Cells*, 15(6), 1-12. doi: 10.1002/face.201500128
- Asensio, J., Peña, J., Pérez, D., Ruiz, J., Marrero, D., Nuñez, P., & Borrós, S. (2011). Pilas de combustible de Membrana polimérica, *Afinidad*, 68(554). Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/viewFile/268104/355685>
- Ashraf Khorasani, M., Asghari, S., Mokmeli, A., Shahsamandi, M., & Faghih Imani, B. (2010). A diagnosis method for identification of the defected cell(s) in the PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17), 9269-9275. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.157
- Bender, G., Angelo, M., Bethune, K., Dorn, S., Thampan, T., & Rocheleau, R. (2009). Method using gas chromatography to determine the molar flow balance for proton exchange membrane fuel cells exposed to impurities. *Journal of Power Sources*, 193(2), 713-722. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.04.028
- Benmouna, A., Becherif, M., Depernet, D., Gustin, F., Ramadan, H. S., & Fukuhara, S. (2017). Fault diagnosis methods for membrane fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(2), 1534-1543. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.181

- Bezmalinovic, D., Simic, B., & Barbir, F. (2015). Characterization of PEM fuel cell degradation by polarization change curves, *Journal of Power Sources*, 30, 82-87. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.06.047
- Blanchet, S., & Domit, E. (2019). Patente US 20190036137A1. United State.
- Bowen, R., & Dengcheng, D. Z. (2019). Study on the uncoupling characteristics of PEM fuel cell by segmented cell technology. *International journal of electrochemical science*, 14(3), 2175-2186. doi: 10.20964/2019.03.12
- Brik, K., Ammar, F., Djerdir, A., & Miraoui, A. (2016). Causal and fault trees analysis of proton exchange membrane fuel cell degradation, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 12(5), 1-8. doi: 10.1115/1.4031584
- Brownson, D., & Banks, C. (2014). *The handbook of graphene electrochemistry*. Springer-verlag London.
- Buonocunto, G., Spagnuolo, G., & Zamboni, W. (Agosto, 2017). A Kalman filter based approach to PEM fuel cell fault detection. *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Edinburgh. doi: 10.1109/ISIE.2017.8001371
- Cabot, P. L. (2013). Applications - Stationary | Cogeneration of Energy and Chemicals: Fuel Cells. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, 146–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.01106-9>
- Cadet, C., Jemei, S., Druart, F., & Hissel, D. (2014). Diagnostic tools for PEMFCs: From conception to implementation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10613-10626. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.163
- Cai, L., Maik Ye, Q., Quan, H., & Quan, S. (2019). Design of single fuel cell voltage acquisition system based on LTC6803-3s and PIC microcontroller. *34rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, Jinzhou, China. doi: 10.1109/YAC.2019.8787564
- Calderon, A. J., Gonzalez, I., Calderon, M., Segura, F., & Andujar, J. M. (2016). A new, scalable and low cost multi-channel monitoring system for polymer electrolyte fuel cell, *Sensors*, 16(3), 349. doi: 10.3390/s16030349
- Calderón, M. (2010). *Estudio, diseño y optimización de un sistema integrado de gestión energética para una instalación autónoma fotovoltaica/eólica con apoyo de hidrógeno*. (Tesis de doctorado, Universidad de Extremadura, Badajoz, España). Recuperada de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=180867>
- Campos, R., Barrios, I., González, & A. (2013). Porosidad y mecanismos de atrapamiento de CO₂. (CIEMAT. Informe 1280. Recuperado de <http://documenta.ciemat.es/handle/123456789/201>

- Castello, R., Puig, V., & Blesa, J. (2016). Introducción a la diagnosis de fallos basada en modelos mediante aprendizaje basado en proyectos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13(2), 186-195. doi.org/10.1016/j.riai.2015.09.011
- Centro de Estudios Energías Renovables (CEER). (2017). Las pilas de combustible, 12. <https://www.cursosenergiasrenovables.net/>
- Cook, B. (2001). An introduction to fuel cells and hydrogen technology, *Engineering Science and Education Journal*, 11(6), 205-216. doi: 10.1049/esej:20020601.
- Cortés, A. (2018). *Desarrollo de electrocatalizadores basados en clústeres de óxido de cobalto para pilas de combustible de membrana de intercambio protónico* (Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperada de <http://hdl.handle/10251/115362>
- Da Costa Lopes, F. (2013). *Modelagem de empilhamentos de células a combustível PEM por redes neurais* (Tesis doctoral, Instituto Alberto Luiz Coimbra). Recuperada de <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/teses-de-doutorado/2013/2013092302-2013092302/file>
- Davies, B., Jackson, L., & Dunnett, S. (2017). Expert diagnosis of polymer electrolyte fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 11724-11734. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.121
- De Blas, J., Lurueña, R., Beneit, A., Martínez, A., Daza, L., & APPICE. (2006). El hidrógeno y las pilas de combustible. El recorrido de la energía, E.i.S.E. Doménech, S.A., Castilla de León, España.
- De la Torre, R., González D., & García, L. (2014). Análisis y optimización de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico. *Ingeniería Energética*, 36(1), 113-124. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000100012&lng=es&tlng=es
- Der Kuan, Y., Septiani, A., & Yuliane, A. (2018). Development of the diagnostic system for fuel cell vehicle using LabVIEW. *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, New Taipei. doi: 10.1109/ICSSE.2018.8520055
- Díaz, M. A. (2015). *Influencia del CO2 alimentado en la corriente de combustible en pilas de combustible tipo PEM de baja y alta temperatura* (Tesis doctoral, Universidad de Huelva). Recuperada de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=46887>
- Dunbar, Z., & Masel, R. (2008). Magnetic resonance imaging as an in-situ diagnostic method to characterize water flooding. *ECS Transactions* 16(2), 1-8. doi: 10.1149/1.2981940
- Echeverri, S. (2013). *Determinación de la permeabilidad de etanol en membranas poliméricas para celdas de combustible*. (Disertación de grado, Universidad del Valle, Santiago de Cali,

- Colombia). Recuperado de:
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/99/discover>
- Elgrishi, N., Rountree, K., McCarthy, B., Rountree, E., Eisenhart, T., & Dempsey, J. (2019). A practical beginner's guide to cyclic voltammetry. *Journal of chemical education*, 95(2) 1-10. doi: 10.1021/acs.jchemed.7b00361
- El-kharouf, A., Mason, T., Brett, D., & Pollet, B. (2012). Ex-situ characterisation of gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 218, 393-404. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.06.099
- Fernández, F. (2008). *Síntesis y caracterización de membranas híbridas organo-inorgánicas para su uso en pilas de combustible* (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperada de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/4325/tesisUPV2974.pdf>
- Flores, A. (2013). Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr*, 52. 3, 105-117, doi: 10.3989/cyv.142013
- Frensch, S. H., Olesen, A. C., Araya, S. S., & Kær, S. K. (2018). Model-supported characterization of a PEM water electrolysis cell for the effect of compression. *Electrochimica Acta*, 263, 228-236. doi: 10.1016/j.electacta.2018.01.040
- García A, & Elizalde, F. (2017). Análisis mediante redes neuronales artificiales del efecto de la interfase canales-electrodo en el desempeño de celdas de combustible de óxido sólido. *Jóvenes en la ciencia*, 7, 1-5. Recuperado de <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1784/1284>
- González, D. (2009). *Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio aniónico con aplicación en celdas de combustible alcalinas* (Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia). Recuperada de <https://core.ac.uk/download/pdf/11051379.pdf>
- González, L., Aldana, D., & Rosa, M. (2012). Principios de resonancia magnética. Guerrero Martínez, J. (2011). Procesado analógico. (pp. 10-11). Recuperado de http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-5/ib_material/IB_T3_OCW.pdf
- Hu, Z., Xu, L., Li, J., Gan, Q., Xu, X., Ouyang, M., . . . Kim, J. (2018). A multipoint voltage-monitoring method for fuel cell inconsistency analysis. *Energy Conversion and Management*, 177, 572-581. doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.077
- Hua, Z., Xua, L., Lia, J., Gana, Q., Xub, X., Songa, Z., Ouyanga, M. (2019). A novel diagnostic methodology for fuel cell stack health: Performance, consistency and uniformity. *Energy Conversion and Management*, 185, 611-621. doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.031

- Huang, Z., Zhao, J., & Jian, Q. (2019). Voltage behavior improvement for proton exchange membrane fuel cell stack suffering fuel starvation. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, 1-16. doi: 10.1080/15567036.2019.1674962
- Husar, A., Strahl, S., & Riera, J. (2012). Experimental characterization methodology for the identification of voltage losses of PEMFC: Applied to an open cathode stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(8), 7309-7315. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.130
- Jaralla, R. (2015). *Proton exchange membrane (PEM) fuel cell parametric study via mathematical modeling and numerical simulation* (Tesis doctoral, Universidad Ryerson). Recuperada de <https://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA%3A4604>
- Lara, C. (2006). *Sellos vitrocerámicos del sistema RO-BaO-SiO₂ (R=Mg, zn) para pilas de combustible de óxido sólido (SOFC)* (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10486/2568>
- Li, K., Li, Y., Liu, J., & Guo, A. (2017). An non-uniformity voltage model for proton exchange membrane fuel cell. *Energy Procedia*, 158, 2118-2125. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.486
- Limitations of current interrupt (CI) method compared with electrochemical impedance spectroscopy (EIS). (2019). Recuperado de <https://www.horiba-fuelcon.com/en/limitations-of-current-interrupt-ci-method-compared-with-electrochemical-impedance-spectroscopy-eis.html>.
- López, A. (2015). *Estudio eléctrico de pilas de combustible tipo PEM* (Tesis de grado, Universidad Pontificia Comillas). Recuperada de <https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/20166/retrieve>
- Luo, L., & Jian, Q. (2019). Experimental study and mitigation of abnormal behavior of cell voltage in a proton exchange membrane fuel cell stack. *Energy Research*, 43(5), 1912-1923. doi: 10.1002/er.4413
- Martínez, M. (2016). *Caracterización de membranas cerámicas mediante técnicas electroquímicas para aplicaciones electrodialíticas* (Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperada de <http://hdl.handle/10251/71375>
- Martínez, S. (2016). Diseño y construcción de un sistema de humidificación para un banco de celdas de combustible PEM. *Revista de Sistemas Experimentales*, 3(8), 23-24. Recuperado de http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num8/Revisata_de_Sistemas_Experimentales_V3_N8_10.pdf

- Maurya, M., Rengaswamy, R., & Venkatasubramanian, V. (2006). A signed directed graph-based systematic framework for steady-state malfunction diagnosis inside control loops. *Chemical Engineering Science*, 61(6), 1790-1810. doi: 10.1016/j.ces.2005.10.023
- Medina, A. (2015). *Caracterización experimental de una pila de combustible de etanol directo* (Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10016/23378>
- Merwe, J., Uren, K., & Bessarabov, D. (2013). A study of the loss characteristics of a single cell PEM electrolyser for pure hydrogen production. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town. doi: 10.1109/ICIT.2013.6505751.
- Meyer, Q., Zeng, Y. & Zhao, C. (2019). In Situ and operando characterization of proton exchange membrane fuel cells. *Advanced Materials*, 31(40), 1901900. doi: 10.1002/adma.201901900
- Migliardini, F., Di Palma, T. M., Gaele, M. F., & Corbo, P. (2019). Cell voltage analysis of a 6 kW polymeric electrolyte fuel cell stack designed for hybrid power systems. *Materials Today: Proceedings*, 10, 393-399. doi: 10.1016/j.matpr.2019.03.002
- Moreno Rodríguez, S. (2016). *Estudio teórico-práctico de la célula de combustible. Caracterización eléctrica y mejoras en la gestión del agua a partir de nuevos materiales*. (Tesis de grado, E.T.S.I. Industriales). Recuperada de: <http://oa.upm.es/39558/>
- Mortazavi, M., Santamaria, A., Benner, J., & Chauhan, V. (2019). Enhanced water removal from PEM fuel cells using acoustic pressure waves. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(7), 3143-3153. doi: 10.1149/2.0211907jes
- Mosa, J. (2008). *Membranas inorgánicas e híbridas orgánico-inorgánicas para pilas de combustible de intercambio de protones* (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10486/1837>
- Moscoso, L. (2014). *Modelización 1+1D de una pila de combustible tipo DMFC* (Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10016/22800>
- Mulder, G., Coenen, P., De Ridder, F., & Martens, A. (2014). An advanced cell voltage monitoring device for fuel cell controls. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(20), 5728-5737. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.017
- Mulder, G., De Ridder, F., Coenen, P., Weyen, D., & Martens, A. (2008). The background of a dedicated on-site cell voltage monitor for fuel cell systems. *ECS Transactions*, 17(1). doi: 10.1149/1.3142763
- National Instrument (2008). Recuperado de <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/4F9771D8587DDD C8862574490018CF62>.

- Ohenoja, M., Sorsa, A., & Leiviskä, K. (2018). Model structure optimization for fuel cell polarization curves. *Computers*, 7(4), 60. doi: 10.3390/computers7040060
- Olivier, M. (2008). Fuel cell characterization. Recuperado de https://moodle.umons.ac.be/pluginfile.php/5937/mod_resource/content/1/Fuel_cells_-_characterization.pdf
- Ortiz, R., Martínez, Y., & Hernández, R. (2006). *Técnicas electro analíticas. Parte II: Voltamperometría* (Tesis de grado, Universidad de los Andes). Recuperada de http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/rmhr/Index_archivos/GuiAIV2.pdf
- Peña, J., Pérez, D., Ruiz, J. M., D, & Núñez, P. (2006). Pilas de combustible . *Real Sociedad Española de Química*, 102, 1-9. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/28204975_Pilas_de_combustible.
- Pérez, M., & Pérez, V. (2012). *Estudio del comportamiento estacionario y dinámico de una pila de combustible tipo pem de 300 w operando en los modos ánodo cerrado o dead-end y ánodo abierto* (Tesis doctoral no publicada, Universidad Politécnica de Valencia). doi: 10.4995/Thesis/10251/16960
- Phillips, R., Friess, B., Hicks, A., Bellerive, J., & Hoorfar, M. (2012). Ex-situ measurement of properties of gas diffusion layers of PEM fuel cells. *Energy Procedia*, 29, 486-495. doi: 10.1016/j.egypro.2012.09.057
- Pouliezos, A., & Stavrakakis, S. (1994). Analytical redundancy methods. in: Real time fault monitoring of industrial processes. international series on microprocessor-based and intelligent systems engineerin. *Real Time Fault Monitoring of Industrial Processes*, 12. doi: 10.1007/978-94-015-8300-8_2
- Purushothaman, A., & Saha, A. K. (2011). Computational modeling and parametric analysis of pem fuel cell. *International Journal of Innovative Research & Development* 15-19-23. <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2019.cob2019-1078>
- Quispe, A., & Espinola, D. (2014). *Simulação e caracterização experimental de célula a combustível unitária tipo PEM*. Trabajo presentado en III Encontro de Iniciação Científica da Unila Pesquisa no século XXI: desafios e possibilidades, Foz do Iguaçu. Resumen recuperado de <https://dspace.unila.edu.br/123456789/1109>
- Realpe, A., Maza, Y., Acevedo, M., & Herrera, A. (2015). Efecto de la sulfonación del estireno-éster acrílico sobre las propiedades de las membranas de intercambio protónico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(1), 99-107. doi: 10.1016/j.riit.2016.01.009
- Rios, J. S. (2016). *Modelización del comportamiento estacionario de una pila de combustible tipo PEM* (Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia). <https://hdl.handle/10251/68392>

- Romero, L, Morales, L., Osornio, R., Romero, R., & Moríñigo, D. (2018). Detección de falla de rodamiento en una cadena cinemática vía emisión acústica. *Pistas educativas*, 39(128). Recuperado de: <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1146>
- Rubio, J., Gomez, J. C., Cortes, C. A., Huesca, E. E. & Bravo, A. G. (2015). Experimental control of a fuel cell. *IEEE Latin America Transactions*, 13(9), 2935-2940. doi: 10.1109/TLA.2015.7350042
- Ruiz, A. (2015). *Estudio de la corrosión electroquímica en los bronce de aluminio con níquel (NAB)* (Tesis de maestría, Universidad de Cantabria). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10902/4489>
- Salas, A. L. (2015). *Estudio eléctrico de pilas de combustible tipo PEM* (Tesis de grado, Universidad Pontificia Comillas). Recuperada de <https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/20166/retrieve>
- Saleh, I. M. M. & Calay, R. K. & Rashid, A. (2013). Modelling and examining open circuit voltage for PEM fuel cells. *Journal of Electrical Engineering*, 13(3), 140-146. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2299/14714>
- Santis, J. A. (2014). *Diseño y simulación de una pila de celda de combustible de tipo membrana intercambiadora de protones* (Tesis de grado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro). Recuperada de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/4560>
- Schiller, G., Gülzow, E., Schulze, M., Wagner, N., & Friedrich, K. A. (2010). Analytical investigation of fuel cells by using in-situ and ex-situ diagnostic methods. *Materials Science Forum*, 638-642, 1125-1130. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.1125
- Seung-Gon, K., Min-Jin, K., & Young-Jun, S. (2015). Segmented cell approach for studying uniformity of current distribution in polymer electrolyte fuel cell operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(35), 11676-11685. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.055
- Simbaña, J. (2016). *Modelado, simulación y optimización de la producción de hidrógeno en un electrolizador a partir de vapor sobrecalentado de agua mediante la herramienta labview de national instruments* (Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional). Recuperada de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16954>
- Spiegel, C. (18 de julio, 2017). Techniques for measuring fuel cell resistance. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/techniques-for-measuring-fuel-cell-resistance>.
- Strah I, S., Husar, A., & Riera, J. (2010). *Study of hydrogen purge effects on performance and efficiency of a pem fuel cell system*. Trabajo presentado en V Congreso Nacional de Pilas de Combustible, Barcelona, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10261/97535>

- Strahl, S. (2014). *Experimental and model based analysis for performance*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10261/127757>
- Suzuki, T., Tanaka, H., Hayase, M., Tsushima, S., & Hirai, S. (2016). Investigation of porous structure formation of catalyst layers for proton exchange membrane fuel cells and their effect on cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(44), 20326-20335. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.078
- Tajiri, K., Karani, j., & Shrivastava, U. (2018). Experimental study of oxygen transport mechanisms in PEMFC interdigitated flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(44), 20326-20335. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.078
- Tapiero, Y. (2015). *Síntesis y caracterización de membranas con capacidad de intercambio iónico para la remoción de cromo hexavalente y trivalente desde disoluciones acuosas*. (Tesis doctoral, Universidad de Concepción). Recuperada de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1839>
- Texas instrument. (2018). *ISO124 ±10-V input, precision isolation amplifier*. Recuperado de <https://datasheet.octopart.com/ISO124P-Texas-Instruments-datasheet-8444209.pdf>
- Torreglosa, D., & Miraoui, A. (2009). Regressive method for the determination of fuel cell pem parameters in order to develop a fuel cell pem emulator. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. doi: 10.1109/IAS.2009.5324869
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., & Kavuri, S. (2003). A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model-based methods. *Computers & Chemical Engineering*, 27(3), 293-311. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00160-6
- Vignolo, J. (enero de 2008). Capacitores de desacoplo. Recuperado de <http://labsei.ucv.cl/NotasTecnicas/Desacoplo/desacoplo.htm>
- Vivas, F. J., De las Heras, A., Segura, F., & Andújar, J. M. (2018). Cell voltage monitoring all in one. A new low cost solution for degradation analysis on polymer electrolyte fuel cells. *European Hydrogen Energy Conference*, Málaga, Spain. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/325657512_Cell_Voltage_Monitoring_All_in_One_A_new_low_cost_solution_for_degradation_analysis_on_Polymer_Electrolyte_Fuel_Cells
- Voltametría cíclica. (2003). Recuperado de <http://huitoto.udea.edu.co/cen/electroquimica/volt.html>.
- World Energy BP statistical review. (2019). (No.68). Recuperado de <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.

- World Energy report. (2019). Recuperado de <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-issues-monitor-2019-managing-the-grand-energy-transition>.
- Yang, Q., Aitouche, A., & Bouamama, B. (2010). Fault detection and isolation of PEM fuel cell system by analytical redundancy. *18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10*, Marrakech. doi: 10.1109/MED.2010.5547857.
- Yang, Q., Aitouche, A., & Ould, B. (2009). Structural analysis for air supply system of fuel cell quan. *International Renewable Energy Congress IREC'09*, Sousse, Tunisia. Recuperado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00804098/>
- Yao, D., Jao, T., Zhang, W., Xu, L., Xing, L., Ma, Q., Su, H. (2018). In-situ diagnosis on performance degradation of high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell by examining its electrochemical properties under operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(45), 21006-21016. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.103
- Yu, Z., Carter, R., & Zhang, J. (2012). Measurements of pore size distribution, porosity, effective oxygen diffusivity, and tortuosity of PEM fuel cell electrodes. *Fuel Cells*, 12(4), 557-565 doi: 10.1002/fuce.201200017
- Zhang, Z., Martin, J., Wu, J., Wang, H., Promislow, K., & Balcom, B. (2008). Magnetic resonance imaging of water content across the nafion membrane in an operational PEM fuel cell. *Journal of Magnetic Resonance*, 193(2), 259-266. doi: 10.1016/j.jmr.2008.05.005
- Zubizarreta, L. (2009). *Desarrollo de nuevos materiales de carbono dopados con níquel para el almacenamiento de hidrógeno* (Tesis doctoral, Universidad de Oviedo). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10261/25035>
- Boškosi, P., Debenjak, A., & Boshkoska, B. (2017). Hardware components for condition monitoring of PEM fuel cells. In Springer (Ed.), (1st ed., pp. 57-58-63) Springer International Publishing. doi:DOI 10.1007/978-3-319-53390-2_6
- Don Baik, K., & Ho Yang, S. (2020). Improving open-cathode polymer electrolyte membrane fuel cell performance using multi-hole separators., 2-3-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.040>
- Giacoppo, G., Hovland, S., & Barbera, O. (2019). 2 kW modular PEM fuel cell stack for space applications: Development and test for operation under relevant conditions., 1683-1696. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.188>
- Sachin Chugh, Chinmay Chaudhari, Kapil Sonkar, Alok Sharma, G.S. Kapur, & S.S.V. Ramakumar. (2020). Experimental and modelling studies of low temperature PEMFC performance ., 8866-8874. doi:DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.019

-
- Yang, Z., Jiao, K., Yan Yin, Z., & DuA, Q. (2020). Investigation of performance heterogeneity of PEMFC stack based on 1+1D and flow distribution models. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112502>.
- Dib, A., Maizia, R., Martemianov, S., & Thomas, A. (2019). Statistical short time analysis for proton exchange membrane fuel cell diagnostic-application to water management., 539-540-547. doi:DOI: 10.1002/fuce.201900060.
- Benouioua, D., Candusso, D., Harel, D., & Oukhellou, L. (2014). PEMFC stack voltage singularity measurement and fault classification., 2-3-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.117>
- Benouioua, D., Candusso, D., Harel, F., François, X., & Picarda, P. (2020). Characterization of low and high frequency phenomena in a PEM fuel cell using singularity analysis of stack voltage ., 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101298>