



Universidad
Carlos III de Madrid

TESIS DOCTORAL

Detección y control del estado de una pila PEM para funcionamiento óptimo: Arquitectura de agentes de percepción y control

Autor:
Wilton Agila Gálvez

Director/es:
Domingo Guinea Díaz
María C. García-Alegre Sánchez
Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

Leganés, Septiembre 2013

TESIS DOCTORAL

DETECCIÓN Y CONTROL DEL ESTADO DE UNA PILA PEM PARA FUNCIONAMIENTO ÓPTIMO: ARQUITECTURA DE AGENTES DE PERCEPCIÓN Y CONTROL

Autor: Wilton Agila Gálvez

Director/es: Domingo Guinea Díaz,
María C. García-Alegre Sánchez,
Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, de de

*A mis padres por apoyarme siempre.
A mi esposa e hijo, gracias por estar ahí
siempre dándome ánimos, a pesar de la distancia.
A mi abuelo y mi suegro.*

Agradecimientos

La finalización de este trabajo de investigación, también representa la culminación de mi estancia en España. Por esta razón, quiero agradecer a todos los que han hecho posible que este tiempo sea de buenos recuerdos.

Sin lugar a dudas tengo que agradecer al Centro de Automática y Robótica (antes IAI), donde se gestó y se realizó esta Tesis, por haber permitido que siga trabajando durante el tiempo que ha tomado la culminación de la misma. Igualmente quiero agradecer al personal de los talleres de electrónico y de mecánico, gracias a todos ellos.

En especial quiero agradecer a las personas que me permitieron formar parte del grupo del Laboratorio de Energías Renovables e Hidrógeno (LER-H) del CAR, Domingo Guinea y Eugenio Villanueva, con los que he compartido tantos momentos, en especial, durante mi estancia en el LER-H. Al grupo que inicio en la CASITA ROJA, la casa de chocolate como algunos la llamaban, a: Leandro, Miguel Ángel, Alberto, Juanma, Carlos, Jorge y David, por sus explicaciones y los buenos momentos de los viernes en la cafetería de Gregorio. A Domingo Miguel, por el tiempo y apoyo brindado incondicionalmente. A Oscar, por las charlas tan rentables de los viernes. A Eugenio Villanueva, por su constante apoyo durante el montaje de las estaciones de experimentación.

Agradezco el trabajo que María C. García-Alegre ha realizado en estos últimos años, sin su punto de vista no hubiera tomado forma la Tesis. A Domingo Guinea, por su apoyo continuo y planteamiento del trabajo realizado. A Carlos Balaguer, por la oportunidad brindada para empezar el doctorado en su departamento y su apoyo durante el periodo de docencia y trabajo de investigación.

Agradezco a toda mi familia, que de un modo u otro, han contribuido a que este trabajo llegue a su culminación; a mi madre, Teresa, por sus constantes preguntas, cuando terminas; a mi Tío Marco por su interés en este proyecto. A los parientes de mi esposa: Manuel, Lorena, Milton, Elsa, Gabriel, Carla, gracias por brindarme su casa durante mi estancia en España, buenos momentos en la vida que no se olvidan.

A los compañeros de Acciona I+D, un grupo multidisciplinar y sin fronteras, pues han sido unos años muy productivos y amenos, gracias a todos.

Finalmente, quiero agradecer a: mi padre, Gonzalo; mi abuelo, Luis, y mi suegro, Edgar (en paz descanse), por su fe y confianza en este proyecto, les estoy muy agradecido.

Y, cómo no, a mis dos Coris, Nicolás y Elisa, gracias por sobrellevar mi ausencia en estos dos años, sus constantes mensajes de amor y ánimo, siempre estarán en mi corazón.

Resumen

En esta memoria se presenta una estrategia de detección de estado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC) en tiempo real, a partir de un método de perturbaciones y un algoritmo de clasificación de estados basado en un árbol de decisión borrosa.

Se analiza la respuesta eléctrica de la pila, en distintos estados de humedad de la membrana, ante una secuencia de perturbaciones, a fin de extraer los mejores descriptores para la etapa de clasificación de estado de la pila.

Las características seleccionadas se utilizan como entradas del modelo de clasificación, basado en un árbol de decisión borroso, que se encuentra encapsulado como agente de percepción de estado en una arquitectura de control basada en agentes expertos.

Este agente de percepción de estado se integra con otros agentes expertos en la generación y gestión de alertas ante fallos y en el control de eficiencia, en una arquitectura de percepción, supervisión y control, en tiempo real, para lograr su funcionamiento autónomo en condiciones óptimas de humectación. La arquitectura integra algoritmos de percepción y control que utilizan información sensorial y de contexto y se encuentra estructurada en una jerarquía de niveles con distinta ventana temporal y nivel de abstracción.

Estas arquitecturas están especialmente indicadas para sistemas complejos, no lineales y con fuertes interacciones entre los subsistemas que lo componen, como es el caso de la pila de combustible PEM. La arquitectura ofrece la flexibilidad, versatilidad y facilidad de reconfiguración requeridas para hacer frente a cambios de tareas, sistema o escenario (requerimientos de potencia de una aplicación).

El trabajo es de carácter multidisciplinar al requerir paradigmas y técnicas provenientes de diferentes disciplinas como: la electroquímica, electricidad, electrónica, ciencias de la computación e inteligencia artificial. El sistema de control inteligente propuesto permite la caracterización y control tanto de mono-celdas con potencias bajas, como de pilas con potencias medias-altas.

El modelo de supervisión y control autónomo de pilas de combustible, se ha validado con diferentes tipos de pilas PEM y condiciones de operación demostrando alta fiabilidad en la consecución del objetivo de eficiencia energética propuesto. El control dinámico de la humectación de la membrana es un claro ejemplo de ello.

Abstract

This manuscript presents a model for Fuel Cell Proton Exchange Membrane (PEMFC) real time state detection, based on a disturbance method and on a fuzzy decision tree classification method.

The perturbations are applied, in different membrane humidification conditions, and the fuel cell electrical response is analyzed, to extract the best descriptors for the classification stage.

The selected descriptors are the inputs of the classification model that is based upon a fuzzy decision tree, which is encapsulated as a state perception agent in a perception and control architecture based on expert agents.

This state perception agent is integrated among other expert agents in fails detection and alert management, and in the efficiency control, in the real time perception and control architecture to get an autonomous operation of the fuel cell in the optimum hydration conditions. The architecture integrates perception and control algorithms that rely on sensors and context information and it is structured in a hierarchy of levels, each with a different temporal window and abstraction degree.

These architectures are particularly suitable for complex non linear systems, with strong interactions among parts, as it happens for the PEM fuel cell. The model displays the flexibility, versatility and ease of configuration required to face variations either in tasks, systems or scenarios (power requirement of a specific application).

The work is multidisciplinary as it manages paradigms, techniques and models from many different areas, such as electrochemistry, electricity, electronics, computer sciences and artificial intelligence. The intelligent control system here proposed allows for the characterization and control of both cells with low power and medium-large stacks with high average power.

The developed monitoring and control system for autonomous fuel cells operation has been demonstrated with different PEM fuel cells and functioning conditions displaying a high reliability in achieving the proposed energy efficiency target.

Índice General

| | |
|--|-----|
| Agradecimientos | 6 |
| Resumen | 8 |
| Abstract | 10 |
| Índice de Figuras | 15 |
| Índice de Tablas | 22 |
| Índice de Símbolos | 24 |
| 1. Introducción | 29 |
| 2. Pilas de Combustible | 34 |
| 2.1. Aspectos generales | 34 |
| 2.1.1. Descripción y características | 35 |
| 2.1.2. Tipos de pilas de combustible y aplicaciones | 37 |
| 2.1.3. Ventajas y desventajas | 39 |
| 2.1.4. La pila de combustible y el medio ambiente | 40 |
| 2.2. Pila de combustible de Membrana Polimérica, PEM | 41 |
| 2.2.1. Fundamentos básicos | 41 |
| 2.2.2. Características eléctricas | 43 |
| 2.2.3. Técnicas de caracterización | 45 |
| 2.2.4. Medida y control en pilas PEM | 50 |
| 2.2.5. Ventajas, fronteras y limitaciones | 52 |
| 3. 3. Análisis de la pila PEM en modo simétrico | 56 |
| 3.1. Monocelda tipo PEM | 57 |
| 3.2. Modelado de la monocelda PEM en modo simétrico | 60 |
| 3.2.1. Proceso de caracterización mediante EIC | 60 |
| 3.2.2. Ajuste de los datos a un circuito equivalente | 63 |
| 3.2.3. Caracterización de la monocelda PEM | 64 |
| 3.2.4. Modelado del circuito equivalente | 66 |
| 3.2.5. Modelo eléctrico de una pila PEM | 72 |
| 3.2.6. Variables de estado relevantes sobre R_m del circuito equivalente | 74 |
| 3.3. Hacia el control autónomo multivariable de la pila PEM | 79 |
| 4. Control de las variables de estado de la pila PEM | 83 |
| 4.1. Variables de estado | 85 |
| 4.2. Sistemas de actuación | 87 |
| 4.2.1. Estabilización de presión en cátodo | 89 |
| 4.2.2. Estabilización de la humedad en la pila | 93 |
| 4.2.3. Control de carga eléctrica | 99 |
| 4.3. Sistema sensorial | 103 |
| 4.4. Controladores de variable única | 105 |
| 4.4.1. Control clásico PID multivariable | 106 |
| 4.4.2. Modelo cualitativo de control en la estabilización de presión | 110 |
| 4.4.3. Análisis comparativo en la estabilización de presión | 114 |
| 4.5. Procesadores y procesos | 116 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.1. Proceso distribuido basado en microprocesadores | 118 |
| 4.5.2. Procesos de comunicación y monitorización..... | 121 |
| 4.6. Control integral de la pila PEM: estación de ensayos | 123 |
| 5. Percepción de estados críticos de la pila PEM: Inundación y deshidratación..... | 127 |
| 5.1. Análisis preliminar | 127 |
| 5.1.1. Fallos en pilas PEM..... | 127 |
| 5.1.2. Técnicas de detección de estado | 129 |
| 5.1.3. Limitaciones en las técnicas actuales | 130 |
| 5.2. Caracterización de estado | 130 |
| 5.2.1. Selección de estados: críticos y normal | 131 |
| 5.2.2. Técnicas de perturbación | 133 |
| 5.2.3. Extracción de características | 138 |
| 5.3. Modelo de clasificación de estados | 147 |
| 5.3.1. Aproximaciones analíticas..... | 147 |
| 5.3.2. Aproximaciones heurísticas..... | 148 |
| 5.3.3. Representación de características mediante conjuntos borrosos | 149 |
| 5.3.4. Clasificación mediante árbol de decisión borroso | 151 |
| 6. Organización del conocimiento y control en una arquitectura de agentes expertos..... | 158 |
| 6.1. Control de la pila PEM | 159 |
| 6.1.1. Análisis del control de la pila PEM | 159 |
| 6.1.2. Objetivos de la arquitectura de control..... | 160 |
| 6.2. Estructura de la arquitectura de percepción y control | 161 |
| 6.2.1. Procesos perceptivos | 163 |
| 6.2.2. Procesos de actuación..... | 163 |
| 6.3. Arquitectura de percepción y control basada en agentes expertos | 164 |
| 6.3.1. Agentes perceptivos..... | 169 |
| 6.3.2. Agentes de actuación | 173 |
| 6.4. Resultados en el control de la pila PEM..... | 190 |
| 6.4.1. Resultados en tareas de caracterización..... | 191 |
| 6.4.2. Experimentos en tareas de control de estado | 197 |
| Conclusiones..... | 204 |
| Aportaciones de este trabajo..... | 205 |
| Desarrollos futuros | 206 |
| ANEXO I. Cálculo de variables de estado | 208 |
| I.1. Requerimientos máximos de caudal anódico y cátodico | 208 |
| I.2. Modelo eléctrico en la regulación de presión..... | 210 |
| I.3. Modelo idealizado mediante la curva V-I..... | 214 |
| I.4. Modo de operación del sistema de clasificación heurístico | 217 |
| Referencias | 221 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Esquema de funcionamiento de un Generador Convencional. | 35 |
| 2.2. Esquema de funcionamiento de una Pila de Combustible. | 36 |
| 2.3. Electrolisis del agua y generación de corriente de una pila de combustible | 36 |
| 2.4. Stack de una pila PEM..... | 37 |
| 2.5. Aplicaciones de las pilas de combustible en función de la potencia..... | 39 |
| 2.6. Esquema de futuro para una Economía del Hidrógeno..... | 41 |
| 2.7. Componentes de una celda de combustible PEM. | 43 |
| 2.8. Curva V-I de polarización de una pila PEM | 44 |
| 2.9. Representación del comportamiento eléctrico de una pila PEM: Curva de polarización V-i y densidad de potencia..... | 45 |
| 2.10. Representación de la impedancia: gráfica de Nyquist | 47 |
| 2.11. Medida de interrupción de corriente. (a) Perfil hipotético de la corriente de carga aplicada a una pila PEM. (b) Hipotética respuesta en el tiempo del voltaje de una pila cuando se aplica la interrupción de corriente | 49 |
| 2.12. Estación experimental básica para una Pila de Combustible..... | 51 |
| 2.13. Diagrama de módulos para un stack de monoceldas PEM | 51 |
| 2.14. Curva de polarización medida en el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)..... | 53 |
| | |
| 3.1. Lámina de 0,1mm de espesor parcialmente corrugada | 57 |
| 3.2. Placa bipolar de acero inoxidable | 57 |
| 3.3. Componentes de la zona superior de una monocelda | 58 |
| 3.4. Componentes de la monocelda PEM utilizada en esta tesis: corte transversal | 59 |
| 3.5. Monocelda PEM ensamblada..... | 60 |
| 3.6. Respuestas en frecuencia de impedancia obtenidas a distintos niveles de voltaje..... | 62 |
| 3.7. CDC correspondiente a un circuito R (CL paralelo)..... | 64 |
| 3.8. Curva de polarización tensión – corriente..... | 64 |
| 3.9. Respuesta en frecuencia de la Z_{pila} con alimentación: Aire/Aire | 65 |
| 3.10. Representación de la Impedancia compleja (Aire/Aire). | 66 |
| 3.11. Representación de la Impedancia compleja (O_2/O_2). | 67 |

| | |
|--|----|
| 3.12. Respuesta en frecuencia de la impedancia $Z(w)$. | 67 |
| 3.13. Ajuste por línea recta a los puntos de alta frecuencia. | 68 |
| 3.14. Resultados tras la substracción de la inductancia L . | 68 |
| 3.15. Ajuste mediante una circunferencia. | 69 |
| 3.16. Datos resultantes tras la substracción del subcircuito ($R2Q$). | 69 |
| 3.17. Ajuste a una línea recta. | 69 |
| 3.18. Datos remanentes tras la substracción del subcircuito (RQ). | 70 |
| 3.19. Comparación de la respuesta en frecuencia medida experimentalmente y de correspondiente al modelo de circuito equivalente identificado. | 71 |
| 3.20. Error entre la respuesta en frecuencia medida e identificada. | 71 |
| 3.21. Circuito eléctrico equivalente de una pila PEM. | 73 |
| 3.22. Respuesta en frecuencia para distintos gases a temperatura de 70°C . | 75 |
| 3.23. Variación de R_m en función del gas inyectado y temperatura de la pila PEM. | 76 |
| 3.24. Variación de la inductancia L en función del gas inyectado a la pila PEM. | 76 |
| 3.25. Valores de R_m para dos grados de humidificación del gas N_2/N_2 , H_2/H_2 en función de la temperatura. | 78 |
| 3.26. Respuesta en frecuencia de la pila durante el proceso de secado con N_2 . | 79 |
| 3.27. Respuesta en frecuencia para distintas tensiones de estímulo. | 81 |
| 3.28. Valores de R para distintas tensiones de estímulo | 81 |
| | |
| 4.1. Variables de estado agrupados en los circuitos específicos de la pila | 86 |
| 4.2. Esquema de integración de válvulas de membrana actuadas neumáticamente para la regulación de la presión y la humedad. | 89 |
| 4.3. Modulación en anchura de pulso (PWM). | 89 |
| 4.4. Sistema de regulación de presión mediante PWM en línea. | 91 |
| 4.5. Modelo eléctrico de la regulación de presión. Estado de la válvula de membrana: a) cerrado; b) abierto. | 91 |
| 4.6. Sistema de regulación de presión eliminando el depósito en línea y trasladándolo al sistema auxiliar de control. | 92 |
| 4.7. Sistema de regulación de la presión de control auxiliar. a) Sistema físico. b) Modelo eléctrico. | 93 |
| 4.8. Sistema de control de humedad de los gases por burbujeo. | 94 |
| 4.9. Sistema físico de regulación de humedad y temperatura de gases en ánodo y cátodo. | 95 |
| 4.10. Sistema de control térmico de una pila de combustible de baja potencia. | 96 |
| 4.11. Esterilla calefactor utilizada para elevar la temperatura de una pila PEM de baja potencia. | 97 |

| | |
|--|-----|
| 4.12. Sistema de acondicionamiento térmico implementado para pilas PEM de potencia media. | 97 |
| 4.13. Secuencia de operación de la gestión térmica de una pila de potencia media. | 98 |
| 4.14. Sistema físico de gestión térmica diseñado e implementado para una pila de potencia media. | 99 |
| 4.15. Secuencia de tiempos de conmutación de la carga y adquisición de datos. | 100 |
| 4.16. Esquema general del sistema de carga electrónica con resistencias conmutadas. | 101 |
| 4.17. Carga electrónica incorporado al control integral de pilas. | 101 |
| 4.18. Esquema general del sistema de control de carga eléctrica con FET de potencia. | 102 |
| 4.19. Carga eléctrica con dispositivos FET de potencia. | 103 |
| 4.20. Esquema de control PID realimentado, implementado para controlar las variables de estado. | 105 |
| 4.21. Diagrama de bloques del sistema de regulación de presión. | 108 |
| 4.22. Resultados de la simulación en la regulación de presión a la entrada de una pila, utilizando el método PWM. a) Respuesta de la presión ante una entrada escalón, b) fluctuaciones en la presión | 108 |
| 4.23. Resultados del controlador PID en la regulación de presión a la entrada de una pila, método PWM. a) Respuesta dinámica real de la presión P_c ante un cambio de consigna, b) fluctuaciones en la presión, características en la modulación todo/nada. | 109 |
| 4.24. Respuesta de la variable presión en el control CONTINUO en línea. | 110 |
| 4.25. Controlador de dos etapas implementado para la estabilización de presión en la pila. | 112 |
| 4.26. Función de pertenencia para la entrada cambio de presión. | 113 |
| 4.27. Fichero de texto con las etiquetas lingüísticas asignadas a las variables borrosas. | 114 |
| 4.28. Evolución temporal de la presión con un controlador PID clásico. | 115 |
| 4.29. Evolución temporal de la presión con la etapa del pre-controlador borroso. | 115 |
| 4.30. Estructura de integración de los subsistemas que componen el sistema de control integral de la pila PEM. | 117 |
| 4.31. Esquema general de la arquitectura hardware diseñada para el control integral de la pila de combustible. | 118 |
| 4.32. Diagrama de bloques de entradas, salidas y comunicaciones del procesador local. | 120 |
| 4.33. Tarjeta universal T-PIC, base física del nodo de control local genérico. | 120 |
| 4.34. Diagrama de flujo del sistema de comunicación. | 121 |
| 4.35. Paquete de datos, maestro \rightarrow esclavo \rightarrow maestro. | 122 |
| 4.36. Esquema de los componentes neumáticos, de calefacción y de carga integrados en el sistema de control de las variables de estado de la pila. | 123 |
| 4.37. Prototipos compactos del sistema de control integral desarrollados para pilas de combustible poliméricas (PEM): a) potencias bajas. b) potencias medias. | 124 |

| | |
|--|-----|
| 4.38. Prototipo de sistema integral de medición y control de variables de estado de una pila: versión educativa..... | 125 |
| 5.1. Curva V-i para los tres estados de operación de la pila PEM en función de los niveles de humedad de la membrana: I) Teórica, II) Experimental..... | 132 |
| 5.2. Representación gráfica de los tres puntos característicos de la curva de polarización donde se aplican los estímulos: salto de carga, salto de caudal y oscilación de intensidad..... | 134 |
| 5.3. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados Seco e Inundado y ante un aumento de carga. | 135 |
| 5.4. Evolución temporal esperada de la tensión generada por la pila PEM en los estados seco e inundado y ante el estímulo de salto de caudal (aumento)..... | 136 |
| 5.5. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados seco e inundado y ante el estímulo de variación de intensidad.. | 137 |
| 5.6. Perturbaciones aplicadas a la pila PEM para extraer de su respuesta temporal los parámetros para la determinación del estado de la pila PEM..... | 137 |
| 5.7. Evolución temporal de la tensión de la pila PEM en tres estados de operación y bajo el mismo salto de carga. a) aumento de carga [+ Δi]; b) disminución de carga [- Δi]...... | 138 |
| 5.8. Proceso de normalización de la tensión generada por la pila PEM ante salto de carga, decremento e incrementorespectivamente. | 139 |
| 5.9. Tensión normalizada para los tres estados de operación de la pila para el mismo salto de carga. | 140 |
| 5.10. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM ante cambios del caudal oxidante. | 141 |
| 5.11. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados Normal (azul), Seco (rojo), Inundado (verde) ante un aumento de caudal..... | 142 |
| 5.12. Variación del voltaje de salida de la pila ante salto de caudal, incremento y decremento..... | 142 |
| 5.13. Respuesta temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados de operación: Seco (roja), Normal (azul), Inundado (verde), ante una perturbación de frecuencia de demanda de intensidad.. | 144 |
| 5.14. Distribución de los valores de amplitud de oscilación de voltaje en los tres estados de operación de la pila PEM.. | 145 |
| 5.15. Distribución de los valores del punto de cambio de pendiente para los tres estados de operación de la pila PEM. | 146 |
| 5.16. Distribución de los valores del parámetro delta voltaje en los tres estados de operación analizados..... | 146 |
| 5.17. Representación mediante conjuntos borrosos de los valores de las características ΔV , $\sigma'v$, y ΔP | 149 |
| 5.18. Valores de la Amplitud de oscilación de voltaje y del punto Cambio de pendiente en diferentes experimentos para tres estados de operación de la pila PEM: Seco, Normal e Inundado. | 151 |

| | |
|---|-----|
| 5.19. Estructura de un árbol de decisión. | 152 |
| 5.20. Evaluación del nodo raíz del árbol de decisión borroso. | 154 |
| 5.21. Evaluación del nodo interno Cambio de Pendiente en el árbol de decisión borroso. | 155 |
| 5.22. Evaluación del nodo interno Delta Voltaje del árbol de decisión borroso. | 154 |
| 5.23. Árbol de decisión borroso implementado para la estimación del estado de operación de la pila PEM en función de los valores de las tres características seleccionadas. | 156 |
| 5.24. Representación de los valores de las características, Amplitud de oscilación del voltaje y punto Cambio de pendiente, para los estados de operación de la pila PEM: Seco, Normal e Inundado. | 156 |
| 5.25. Representación de las características: a) Diferencia de voltaje y punto Cambio de pendiente. b) Amplitud de oscilación del voltaje y Diferencia de voltaje, para tres estados. | 157 |
| | |
| 6.1. Esquema conceptual de un agente. | 162 |
| 6.2. Transiciones de estado en los agentes perceptivos. | 163 |
| 6.3. Transiciones de estados en los agentes de actuación. | 164 |
| 6.4. Jerarquía de agentes expertos para control autónomo de la pila PEM en condiciones óptimas de humectación. | 166 |
| 6.5. Arquitectura de agentes expertos de percepción y actuación: variables en memoria compartida y resolución temporal por niveles. | 168 |
| 6.6. Agente PERCIBIR ALERTA. | 170 |
| 6.7. Flujo de información en el agente PERCIBIR ALERTA. | 172 |
| 6.8. Agente perceptivo ACTUALIZAR ESTADO. | 173 |
| 6.9. Estados de operación de la pila PEM, salida del agente ACTUALIZAR ESTADO. | 173 |
| 6.10. Agente GESTIONAR ALERTA. | 174 |
| 6.11. Diagrama de flujo de información del agente GESTIONAR ALERTAS. | 175 |
| 6.12. Agente PARADA AUTOMÁTICA. | 176 |
| 6.13. Agente CALCULAR CURVA V-I | 177 |
| 6.14. Flujo de información en el agente CALCULAR CURVA V-I. | 178 |
| 6.15. Agente de actuación CONTROL RENDIMIENTO. | 180 |
| 6.16. Localización de los tres puntos de la curva V-I donde se aplican las perturbaciones. | 181 |
| 6.17. Agente de actuación GENERAR PERTURBACIÓN. | 182 |
| 6.18. Flujo de información en el agente GENERAR PERTURBACIÓN. | 183 |
| 6.19. Agente de actuación CONTROL ESTADO. | 184 |
| 6.20. Esquema del controlador borroso de estado de la pila. | 186 |
| 6.21. Variable de salida del controlador, tiempo de humectación. | 186 |

| | |
|---|-----|
| 6.22. Estructura interna del controlador borroso..... | 187 |
| 6.23. Diagrama Flujo de información del agente CONTROL ESTADO.. | 189 |
| 6.24. Agente de actuación CONFIGURAR. | 189 |
| 6.25. Diagrama de flujo de información del agente CONFIGURAR. | 190 |
| 6.26. Interfaz de usuario del agente MONITORIZAR. | 191 |
| 6.27. Interfaz de usuario del agente CONFIGURAR en modo experimentación. | 192 |
| 6.28. Condiciones iniciales fijadas por el usuario en el agente CONFIGURAR..... | 194 |
| 6.29. Evolución temporal del voltaje y corriente en la obtención del valor de I_{cc} | 194 |
| 6.30. Evolución temporal del voltaje y corriente en el cálculo de la curva V-I..... | 195 |
| 6.31. Curva de polarización V-I y de potencia de la monocelda AL_N2_P2. | 196 |
| 6.32. Curva de polarización V-I de la pila P18 en dos ensayos con diferente caudal. | 197 |
| 6.33. Condiciones iniciales de Control de estado fijadas por el usuario en el agente CONFIGURAR. | 198 |
| 6.34. Evolución temporal del voltaje y corriente en el cálculo de I_{cc} y curva V-I..... | 199 |
| 6.35. Evolución temporal del caudal y las variables eléctricas de la pila en el proceso de detección de estado. | 200 |
| 6.36. Evolución de la curva V-I de la pila PEM en el proceso de control de estado. | 201 |
| 6.37. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM durante la perturbación salto de caudal. | 202 |
| 6.38 Evolución de la corriente de cortocircuito I_{cc} durante la ejecución del agente CONTROL ESTADO..... | 202 |
| | |
| I.2.1. Sistema de regulación de presión mediante PWM en línea..... | 210 |
| I.2.2. Sistema de regulación de presión en estado cerrado de la electroválvula, a) subsistema físico, b) modelo eléctrico análogo. | 211 |
| I.2.3. Curva experimental, para el cálculo de la resistencia al flujo de gas R..... | 212 |
| I.2.4. Sistema de regulación de presión en estado abierto de la electroválvula. a) subsistema físico, b) modelo eléctrico análogo. | 213 |
| | |
| I.3.1. Modelos utilizados para el cálculo de los valores de resistencia de la carga eléctrica..... | 214 |
| I.3.2. Modelo de caída de tensión e idealizado de la curva de polarización de la pila..... | 215 |
| | |
| I.4.1. Flujo de datos en el sistema de decisión de estados. | 217 |
| I.4.2. Diagrama de módulos del sistema de decisión de estados..... | 218 |
| I.4.3. Parámetros de configuración de las funciones de pertenencia de las variables del sistema de decisión de estados..... | 218 |
| I.4.4. Representación gráfica de la variable (ΔV , σ_V , ΔP). | 219 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----|
| 2.1. Características de los principales tipos de pilas de combustible..... | 37 |
| 2.2. Representación de impedancias en el diagrama de Nyquist. | 48 |
| 3.1. Espesor y dimensiones de los componentes de la monocelda | 59 |
| 3.2. Valor de los parámetros RL serie tras el ajuste por una línea..... | 68 |
| 3.3. Valor de los parámetros del circuito equivalente y error relativo..... | 70 |
| 3.4. Valores de los componentes de los circuitos equivalentes de la pila PEM..... | 72 |
| 4.1. Intervalos de valores de las variables de estado a controlar..... | 87 |
| 4.2. Técnicas directas e indirectas de medida de variables de estado de la pila | 104 |
| 5.1. Condiciones de operación de la pila en tres estados | 133 |
| 5.2. Valores de punto de cambio de pendiente de la tensión normalizada para tres estados..... | 141 |
| 5.3. Valores de la diferencia de tensión “DELTA Voltaje” ante un cambio de caudal en el cátodo, para los tres estados | 143 |
| 5.4. Valores de la desviación típica móvil en los tres estados de operación de la pila PEM ante la perturbación frecuencia de oscilación de intensidad..... | 144 |
| 5.5. Valores de los parámetros para cada conjunto borroso de cada una de las tres características [ΔV , $\sigma'v$, y ΔP] | 150 |
| 5.6. Valores numéricos de las tres características obtenidas a partir de medidas experimentales durante la operación de la pila..... | 153 |
| 6.1. Funciones de estimación de alerta..... | 171 |
| 6.2. Componentes de la monocelda PEM, AL_N2_P2..... | 193 |
| 6.3. Valores de las variables de estado en el cálculo de la curva V-I | 195 |
| 6.4. Condiciones iniciales de operación de la pila con el agente el Control Estado | 198 |
| I.2.1. Rango de valores de la presión de entrada y control en la pila de combustible | 210 |

Índice de Símbolos

| | |
|-----------------|---|
| Δ | Cambio en ... |
| ΔH | Cambio de entalpía. |
| ΔP | Parámetro punto cambio de pendiente en la perturbación salto de carga |
| ΔS | Cambio de entropía. |
| Δt_H | Tiempo de humectación de los gases inyectados a la pila |
| ΔV | Parámetro diferencia de voltaje en la perturbación salto de caudal |
| σV | Parámetro amplitud de oscilación de voltaje en la perturbación de oscilación de intensidad |
| C | Capacitancia. |
| C_{pc} | Seudo-capacitancia relacionada con la doble capa electrolítica. |
| CO_2 | Dióxido de Carbono |
| CO | Monóxido de carbono |
| dt | Pequeña variación de tiempo |
| e_k | Variable de error discretizada |
| e^- | Electron |
| e^+ | Proton |
| e_{k-1} | Variable de error discretizada en un intervalo k-1 de muestreo |
| E^0 | Representa el valor del potencial de la pila de combustible (1,21V) a condiciones estándar. |
| F | Constante de Faraday. [9,64853x10 ⁴ C.mol ⁻¹]. |
| H_2 | Hidrogeno gaseoso. |
| H_2O | Agua |
| H^+ | Protones |
| i_0 | Densidad de corriente inicial intercambiada, depende de la temperatura y del catalizador [mA/cm ²]. |
| i | Densidad de corriente intercambiada. |
| i_l | Corriente limite debido a los limites impuestos por el transporte de masa. |
| I | Corriente generada por la pila |
| I_{cc} | Corriente de cortocircuito generada por la pila |
| K | Constante proporcional del controlador PID |
| K_i | Constante de integración del controlador PID |
| K_d | Constante derivativa del controlador PID |
| \dot{m}_{O_2} | Flujo másico del oxígeno |

| | |
|------------------|---|
| \dot{m}_{H_2} | Flujo másico del hidrogeno |
| \dot{m}_{Aire} | Flujo másico del aire |
| NO _x | Óxidos de nitrógeno |
| N ₂ | Nitrógeno gaseoso |
| n | Numero de moles |
| η_{con} | Sobre-tensión de saturación |
| η_{act} | Sobre-tensión de activación |
| η_{res} | Sobre-tensión de la caída óhmica |
| O ₂ | Oxigeno gaseoso. |
| P | Presión |
| Q | Caudal |
| R | Constante universal de los gases [8,31451x10 ⁻² L.bar.K ⁻¹ mol ⁻¹]. |
| R | resistencia |
| L | Inductancia en el modelo eléctrico equivalente de la pila |
| SO _x | Óxidos de asúfre |
| T | Representa la temperatura de la pila expresada en grados Kelvin. |
| t | tiempo |
| μ_k | Variable de control discretizada |
| μ_{k-1} | Variable de control discretizada en un intervalo k-1 de muestreo |
| Z_d | Impedancia difusa. |
| Z_{real} | Impedancia real |
| Z_{imag} | Impedancia imaginaria |
| α | Coficiente de transferencia de carga |
| λ_{O_2} | Estequiometria del oxigeno. |
| λ_{H_2} | Estequiometria del hidrogeno. |
| λ_{Aire} | Estequiometria del aire. |
| %HR | Humedad relativa del gas que se inyecta a la pila. |

Unidades

| | |
|-----|--------------------|
| A | Amperios |
| bar | Bares |
| °C | Grados centígrados |
| °K | Grados kelvin |
| Kg | Kilo gramos |
| kW | Kilo Wattios |
| mV | Milivoltios |

| | |
|--------------------|--------------------------------------|
| mW/cm ² | Milivatios / centímetros cuadrados |
| mA | Miliamperios |
| mA/cm ² | Miliamperios / centímetros cuadrados |
| ml/min | Militros /minutos |
| mW | Milivatios |
| L/min | Litros /minutos |
| V | Voltios |
| W | Vatios |
| Ω | Ohmios |
| h | Horas |
| min. | Minutos |
| s | Segundos |

Abreviaciones

| | |
|----------------------|---|
| A/D | Convertidor analógico – digital |
| CDC | Código de descripción de un circuito eléctrico equivalente |
| <i>EIC</i> | Espectroscopia de impedancia compleja. |
| ECU | Unidad de control electrónica. |
| FC | Fuel cell |
| Gc(s) | Función de transferencia de un controlador PID |
| I _{max} | Corriente máxima del modelo de la carga |
| I _p | Corriente en el punto de máxima potencia |
| I ² C | Protocolo de comunicación entre microcontroladores PIC |
| MQ | Medidor de caudal de agua refrigerante |
| <i>m1</i> | Pendiente con caída moderada en el modelo de carga |
| <i>m2</i> | Pendiente con fuerte caída por inestabilidad en el modelo de carga |
| MEA | Membrane Electrode Assembly. |
| nc | Número de monoceldas en un stack |
| PWM | Modulación de ancho de pulso |
| P _c | Presión a controlar en el modelo eléctrico de regulación de presión |
| PID | Controlador proporcional, integral y derivativo |
| P _i | Presión de entrada en el modelo eléctrico de regulación de presión |
| P _a | Presión atmosférica |
| <i>p_i</i> | Desviaciones pequeñas de presión de entrada a partir de su valor de estado estable. |
| <i>p_o</i> | Desviaciones pequeñas de presión a la salida a partir de su valor de estado estable |
| P _{max} | Potencia máxima del modelo de la carga electrónica. |

| | |
|------------|---|
| P_e | Potencia eléctrica generada por la pila. |
| PIC | Microcontrolador pic. |
| PEMFC | Pila de combustible de membrana de intercambio protónico. |
| PEM | Proton Exchange Membrane. |
| RC-FC | Resistencia calefactor adherida en la pila |
| T | Periodo utilizado en la modulación PWM |
| TP | Transductor de presión |
| TK | Termopar tipo k en la pila |
| T-PIC | Tarjeta electrónica universal que trabajar como maestro o esclavo. |
| V_c, V_p | Voltaje generado por la pila. |
| V | Voltaje |
| I | Corriente |
| I_{cc} | Corriente de cortocircuito |
| T | Temperatura |
| Q | Energía |
| pi | Desviaciones pequeñas de caudal a la entrada a partir de su valor de estado estable |
| qo | Desviaciones pequeñas de caudal a la salida a partir de su valor de estado estable |
| R_m | Resistencia eléctrica de la membrana polimérica |
| R_L | Resistencia de carga eléctrica |
| V_{max} | Voltaje máximo del modelo de la carga |
| V_m | Válvula de membrana |
| V_p | Voltaje en el punto de máxima potencia |

CAPÍTULO 1

Introducción

El siglo XX ha marcado en muchos países un crecimiento espectacular de la economía y del nivel de vida global. El gran motor de este desarrollo ha sido el acceso a la energía al disponer de combustibles fósiles sin límite aparente, en particular del petróleo. Este recurso se ha convertido en el pilar base de la sociedad actual, con demandas crecientes durante las últimas décadas [EEA, 2012]. De hecho, la necesidad de este combustible se ha multiplicado tanto en los países desarrollados como en los subdesarrollados, que se incorporan a la sociedad de consumo, lo que ha provocado un aumento en el coste del petróleo, de 50 dólares/barril en 2003, a 104 dólares/barril actualmente. Por otro lado, su uso en grandes cantidades, supone un impacto negativo en el medio ambiente incrementando de manera exponencial los gases de efecto invernadero que hoy día constituyen una amenaza al clima [EEA, 2008].

Ante este problema surge la necesidad creciente de encontrar fuentes de energía alternativas. A tal fin, se proponen modelos energéticos basados en fuentes de energía solar, eólica y de biocombustibles [The World Bank, 2010]. Las energías renovables presentan el inconveniente de que no se generan en todos los períodos en los que se necesitan, sino que están sujetas a cambios incontrolables, como sucede con el viento o la radiación solar. De ahí la necesidad de encontrar un vector energético que almacene esta energía, y por ello se plantean modelos basados en el hidrógeno [NETL, Technical report], la denominada economía del hidrógeno. El hidrógeno no constituye una fuente de energía sino otro portador energético limpio, eficiente y versátil, que se establece como un buen complemento a la electricidad. Pero sin lugar a dudas, el gran atractivo del hidrógeno consiste en que ofrece la posibilidad de establecer un escenario de ciclo energético cerrado intrínsecamente limpio. La generación de este combustible puede tener su origen en el agua o en cualquier otro material hidrogenado,

como son los residuos orgánicos, y su generación puede efectuarse mediante energías renovables (*electrólisis*). Posteriormente, es posible almacenarlo, transportarlo, distribuirlo y finalmente, utilizarlo en combinación con el oxígeno o el aire siguiendo un proceso electroquímico mediante una *pila de combustible*, para generar energía eléctrica. En esta conversión electroquímica las emisiones de productos contaminantes son nulas, desprendiéndose únicamente agua.

A pesar, de que la pila de combustible es un dispositivo conceptualmente sencillo con indudables ventajas sobre la mayoría de los sistemas conocidos de generación eléctrica, en los procesos de difusión de gases, disociación y conducción mixta electrón-protón, que en ella tienen lugar, en su operación se encuentran implicadas un gran número de variables, tanto estructurales como funcionales íntimamente relacionadas entre sí, lo que hace que su diseño sea complicado y su operación óptima extremadamente compleja.

La dificultad de establecer un modelo analítico preciso de la pila de combustible PEM, debido a su comportamiento no lineal con múltiples interacciones entre las variables de estado, dificulta el uso de modelos de control clásico que aseguren la estabilidad deseada en la humedad en la pila y en consecuencia en su respuesta eléctrica. Sin embargo, los progresos en control inteligente aplicados a las pilas de combustible PEM se encuentran restringidos al ámbito universitario o en el marco de proyectos de investigación tanto a nivel regional como Nacionales o Europeos, programas de I+D (FP7 o EUREKA). Entre ellos se encuentran los proyectos H2Susbuild [H2Susbuild, FP7] y FC-DISTRIC [FC-Distric, Grant, no 260105]. Los objetivos de estos proyectos son la implantación de estrategias de control avanzadas, basadas en técnicas de inteligencia artificial, pero con limitaciones en cuanto al tipo de procesos a los que son aplicables, debido a que no están aplicadas a la gestión en sí de la operación y estabilidad de la pila PEM, sino a su integración con el entorno, manteniendo estático y predeterminado su modo de operación. Limitaciones que son imprescindibles para mejorar el rendimiento eléctrico de la pila de combustible PEM durante su funcionamiento y alargar la vida útil de sus componentes.

En esta dirección, constituye un reto la automatización completa en modo de funcionamiento autónomo y en condiciones óptimas de humectación de la pila de combustible PEM, tanto para su caracterización como para su integración en diferentes tipos de escenarios de suministro eléctrico, potencia y eficiencia máxima. Uno de los puntos claves, es la inclusión de mecanismos de estimación y control del grado de humectación –*estado de operación*– de la pila, para garantizar tanto eficiencia como seguridad en su operación.

El objetivo de este trabajo es el diseño de una arquitectura de control multivariable para el funcionamiento óptimo y autónomo de una pila PEM a partir de la detección, en tiempo real, del estado de la pila mediante técnicas de razonamiento aproximado basadas en lógica borrosa (Fuzzy). Este objetivo global se divide en los siguientes sub-objetivos específicos:

- Análisis de la tecnología de las pilas de combustible, con especial atención en las pilas PEM. Se trata de determinar las variables más relevantes de su respuesta eléctrica, así como, la viabilidad de los sistemas implementados en el control de las pilas PEM.

- Análisis del comportamiento electroquímico de la pila de combustible PEM en modo simétrico, suministrando el mismo gas en ambos lados de la pila. Esto permite conocer que variables son más sensibles a la variación del grado de humedad de la membrana en la pila de combustible, al alterar las variables de estado con perturbaciones. Este análisis es de gran utilidad para el diseño de nuevos modelos de estimación del estado de la pila PEM.
- Desarrollo de un sistema de control integral de las variables de estado de la pila PEM para funcionamiento autónomo en condiciones óptimas de humectación. Desarrollo e implementación de los controladores mediante el uso del control clásico de múltiples variables y el diseño de un control borroso para la estabilización de presión en cátodo y ánodo de la pila PEM. La incorporación de sistemas alternativos e integración de las múltiples variables facilita el estudio de un amplio intervalo de potencias en las pilas PEM, desde su investigación a escala de laboratorio hasta su operación en una aplicación específica.
- Investigación y desarrollo de una nueva técnica de detección en tiempo real de estados críticos de operación de la pila PEM. Los resultados de esta técnica de perturbación constituye la base del modelo de razonamiento cualitativo propuesto para la toma de decisión en el control autónomo de las variables de operación de la pila PEM, a fin de conseguir el grado de humectación requerido para su operación óptima.
- Modelado de los procesos de percepción y control de la pila mediante una arquitectura distribuida de percepción y control para la gestión inteligente de la pila de combustible PEM. Esta arquitectura se concibe como un modelo multi-agente con distintos agentes perceptivos y de actuación, necesarios para garantizar: robustez, adaptabilidad, reutilización y consecución de los objetivos.
- Validación de la arquitectura integral en el funcionamiento autónomo en las condiciones de humectación necesarias para el funcionamiento óptimo de varios tipos de las pilas PEM.

Este trabajo ha sido realizado en el Centro de Automática y Robótica (CAR) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-UPM). El desarrollo de la investigación se ha realizado en el Laboratorio de Energías Renovables e Hidrógeno (LERH), en el marco de los proyectos del Plan Nacional: MCYT-ENE2005-09124_C04-02/ALT “Diseño y realización de una nueva Pila de Combustible Polimérica de bajo coste y alta eficacia, CICYT-ENE2008-06888-C02-02 “Materiales y dispositivos para una pila de combustible en una arquitectura inteligente de control para su integración en un sistema energético autosuficiente, CICYT-ENE2009-14750-C05-00 “Optimización de PEMFC en aplicaciones residenciales: Diseño, integración, análisis y modelado cualitativo del comportamiento de pilas PEM”.

La memoria está estructurada en seis capítulos y un apéndice. A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos.

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentan las motivaciones para el desarrollo del trabajo de investigación, los objetivos y la organización de la memoria.

Capítulo 2: PILAS DE COMBUSTIBLE.

Se describen las características relevantes de la tecnología de las pilas de combustible, haciendo énfasis en las pilas de combustible tipo PEM. Se concluye con una valoración de las limitaciones encontradas en los sistemas automatizados de medida y control de pilas PEM.

Capítulo 3: ANÁLISIS DE LA PILA PEM EN MODO SIMÉTRICO.

Para mantener de manera autónoma el punto de operación de una pila PEM en la zona óptima de humectación, objetivo de esta tesis, el primer paso, consiste en determinar que variables de estado de la pila se ven más influenciadas por el grado de humedad de la membrana de una pila. En esta dirección, este capítulo se ha dividido en dos partes:

- Una breve descripción de los componentes y del montaje de una monocelda de combustible PEM, sistema a controlar.
- Análisis del comportamiento electroquímico de la pila en condiciones de suministro de gases en modo simétrico, para obtener un modelo eléctrico equivalente de la pila de combustible PEM y demostrar la variación de los parámetros del modelo en función del grado de humectación de la pila, mediante técnicas de espectroscopia de impedancia compleja.

Capítulo 4: CONTROL DE LAS VARIABLES DE ESTADO DE LA PILA PEM.

La automatización del control de las variables de estado que más afectan al grado de humectación de la membrana de una pila, posibilita su funcionamiento óptimo. En este capítulo se presenta una *arquitectura abierta* basada en una red local multiprocesador, para la medida y control de las variables de estado de la pila de combustible PEM. Se detalla: la determinación de los procesos de actuación más apropiados, la arquitectura hardware-software y, el desarrollo e implementación de los controladores de variable única. Para finalizar con su integración en lo que se denomina estación de ensayos.

Capítulo 5: PERCEPCIÓN DE ESTADOS CRÍTICOS DE LA PILA PEM: INUNDACIÓN Y DESHIDRATACIÓN.

Se analizan las técnicas utilizadas actualmente y se propone una técnica innovadora de estimulación-percepción para su implementación en tiempo real en la detección y clasificación del estado normal y críticos de la pila PEM. El algoritmo de percepción de estado está basado en un árbol de decisión borroso, cuyas hojas terminales representan los estados de de la pila.

Capítulo 6: ORGANIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO Y CONTROL EN UNA ARQUITECTURA DE AGENTES EXPERTOS.

Se analizan las estrategias de control de la pila de combustible PEM y se formulan los requisitos de partida de la arquitectura, describiéndose cada uno de los módulos de la arquitectura de control *multi-agente* propuesta para el control autónomo-óptimo de la pila de combustible PEM. Esta arquitectura tiene como principales pilares los principios de reutilización de habilidades y facilidad de escalado. El capítulo finaliza mostrando los resultados de la experimentación realizada que permite la validación de los modelos y técnicas propuestos e implementados para conseguir el funcionamiento autónomo y óptimo de la pila en condiciones estables de humectación.

CONCLUSIONES.

Se presenta el grado de satisfacción alcanzado de los objetivos propuestos, analizando las posibles líneas de investigación que este trabajo deja abiertas, para ser abordadas en una etapa posterior.

Anexo I: CÁLCULO DE VARIABLES DE ESTADO.

Se recoge los procedimientos y cálculos de: los requerimientos máximos de caudal anódico y cátodo; modelo eléctrico del suministro del flujo de gas en el cátodo para la regulación de presión en la pila; modelo idealizado de la curva V-I para el diseño de la carga eléctrica; y modo de operación del sistema de clasificación heurístico.

Referencias

Referencias bibliográficas utilizadas en la presente memoria.

CAPÍTULO 2

Pilas de Combustible

Se podría presentar una pila de combustible como una “fábrica”, cuyas entradas son los combustibles gaseosos (materia prima) y su salida es la electricidad (producto). Las baterías, al igual que la pila de combustible, basan su funcionamiento en un proceso electroquímico, sin embargo la pila de combustible mantiene su capacidad de generar energía eléctrica durante su operación, lo que no sucede con las baterías o pilas convencionales, que pierden lentamente su capacidad de generar energía eléctrica durante su operación. De hecho, las pilas de combustible a diferencia de las baterías o pilas convencionales, no necesitan ser recargadas y proporcionan energía eléctrica siempre que se les suministre combustible, Hidrógeno y aire u otro agente oxidante.

Por ello, una pila de combustible puede considerarse como una fábrica que transforma directamente la energía química almacenada en el combustible en energía eléctrica, esto es, *las pilas de combustible* son dispositivos electroquímicos, cuya función es convertir la energía química de un combustible (hidrógeno o metanol para las de operación a baja temperatura) en energía eléctrica, aunque algunas de ellas también se utilizan para convertir la energía eléctrica en química, y a este tipo de dispositivos se les denomina *electrolizador*.

2.1. Aspectos generales

2.1.1. Descripción y características

Para liberar la energía química que los combustibles poseen, es necesario que participen en una reacción, y la forma más habitual de realizarlo es mediante su combustión. La combustión es la reacción del combustible orgánico con oxígeno para formar dióxido de carbono, agua y calor. Este proceso permite la transformación de la energía química en energía térmica y usualmente es realizado por una máquina térmica (generador convencional). Estas máquinas están sometidas al segundo principio de la termodinámica y la eficiencia máxima está condicionada por el llamado *Ciclo de Carnot*. En una máquina térmica el agente motor se encuentra a una temperatura T_1 con una energía Q_1 y siguiendo el segundo principio de la termodinámica, cede parte de su energía para producir trabajo mecánico a una temperatura $T_2 < T_1$ con una energía $Q_2 < Q_1$. A temperaturas usuales de funcionamiento de las máquinas térmicas su eficiencia no supera el 40%, lo que supone una pérdida muy importante de la energía química almacenada en el combustible.

En una máquina térmica, la energía química del combustible se transforma en energía eléctrica, después de transformarse en energía térmica y posteriormente en energía mecánica, Figura 2.1.

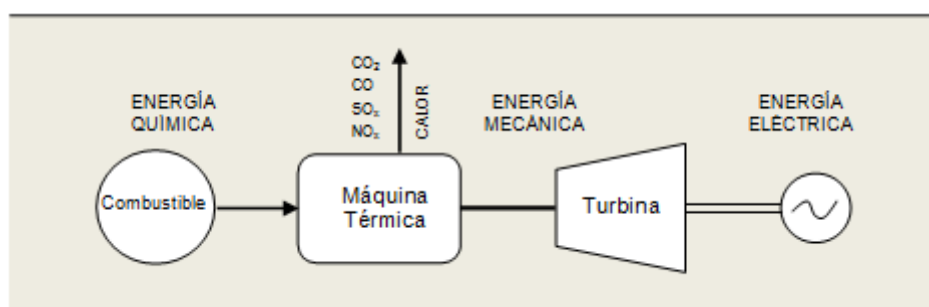


Figura 2.1. Esquema de funcionamiento de un Generador Convencional

Una alternativa al generador convencional, lo constituyen las **Pilas de Combustible** que transforman directamente la energía química del combustible en energía eléctrica en el mismo dispositivo. Además, al no tratarse de una máquina térmica no está sometida al límite de rendimiento teórico que impone el Ciclo de Carnot, siendo, en principio, su rendimiento teórico máximo del 100%.

Básicamente, una pila de combustible es un convertidor energético electroquímico que transforma directamente la energía química almacenada en el combustible en energía eléctrica sin la mediación de procesos térmicos y mecánicos, como lo hacen las máquinas térmicas, sin lugar a dudas, la característica más relevante de la pila de combustible es la capacidad de generar potencia limpia, directa y de alto rendimiento energético. Figura 2.2.

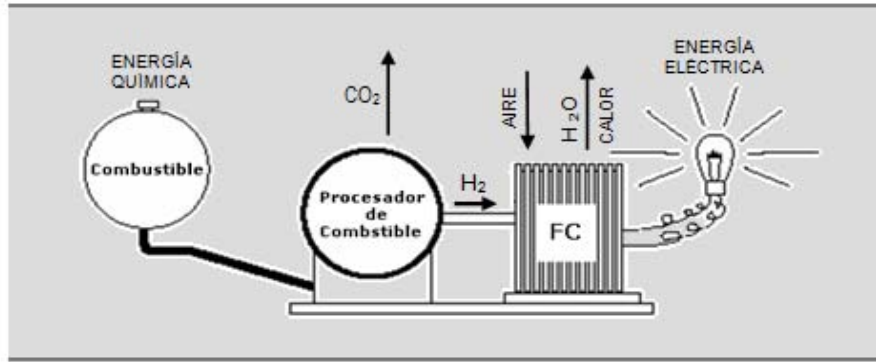


Figura 2.2. Esquema de funcionamiento de una Pila de Combustible.

Las pilas de combustible, fueron descubiertas en el año de 1839 por el británico Sir William Grove. Este científico procedió a realizar la electrólisis del agua a escala de laboratorio obteniendo hidrógeno y oxígeno, Figura 2.3a, para posteriormente re-combinarlos a través de una capa delgada de electrolito, recuperando así una parte de la energía eléctrica consumida, Figura 2.3b. Este dispositivo electroquímico fue mejorado en el año de 1894 por el Químico Alemán Wilhelm Ostwald. Olvidado durante casi un siglo, ha sido en las últimas décadas cuando ha vuelto a convertirse en un tema de gran interés, especialmente las denominadas pilas de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane).

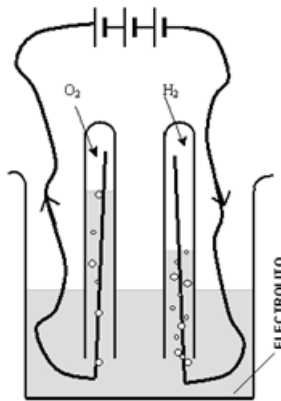


Figura 2.3a Electrólisis del Agua. El agua es separada en H_2 y O_2 por el paso de una corriente eléctrica.

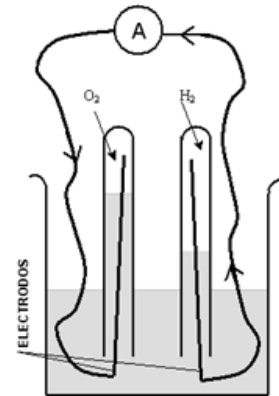


Figura 2.3b Generación de corriente eléctrica ante la recombinación de H_2 y O_2 a través del electrolito.

Figura 2.3. Electrólisis del agua y generación de corriente de una pila de combustible.

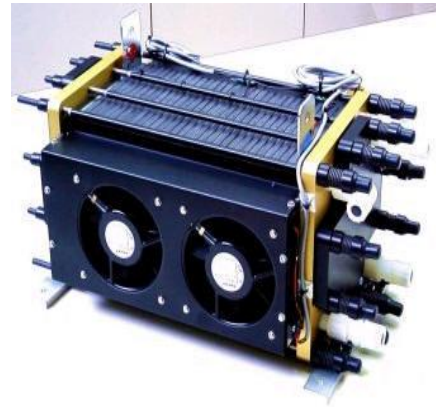
La corriente eléctrica producida por la pila de combustible es directamente escalable con el tamaño del área activa de la misma, donde: los gases, electrodos y electrolito se unen produciendo una reacción electroquímica [James L. y Andrew D, 2000]. Para garantizar una gran superficie de reacción que maximice la relación superficie-volumen, las pilas de combustible se construyen con una estructura rectangular, plana y delgada, denominada celdas.

La celda constituye la unidad mínima necesaria para transformar energía química en eléctrica. Si se utiliza una única celda de forma aislada, el dispositivo resultante se denomina

“*monocelda*”. Sin embargo, dado que cada una de estas celdas produce intensidades de varios amperios, pero tensiones de algunas décimas de voltio, estas celdas se suelen conectar en serie, Figura 2.4a, dando lugar a los llamados “*stack*” de pilas de combustible, Figura 2.4b.



2.4a. Montaje de un stack PEM



2.4b. Stack de 700 W.

Figura 2.4. Stack de una pila PEM.

2.1.2. Tipos de pilas de combustible y aplicaciones

Se puede considerar que existen cinco tipos de pilas de combustible, diferenciadas unas de otras, por el electrolito empleado, el combustible que utilizan y la temperatura a la que trabajan. Cada tipo resulta más apropiado para un conjunto de aplicaciones:

- Pila de combustible alcalina: Alkaline Fuel Cell, AFC.
- Pila de combustible de ácido fosfórico: Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC.
- Pila de combustible de membrana de intercambio protónico: Proton Exchange Membrane, PEMFC, y metanol directo: Direct Methanol Fuel Cell, DMFC
- Pila de combustible de óxidos sólidos: Solid Oxide Fuel Cell, SOFC.
- Pila de combustible de carbonatos fundidos: Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC.

Las pilas de membrana de intercambio protónico, en función del combustible que utilicen, se dividen en: pilas de hidrógeno (PEMFC) y pilas de metanol directo (DMFC). Un resumen de las principales características de estas pilas se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de los principales tipos de pilas de combustible.

| | Electrolito | Combustible | Potencia [kW] | Temperatura [°C] | Eficiencia Eléctrica [%] |
|-----|--------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|
| AFC | solución | Hidrógeno | 10 a 100 | 60–220 | Celda: 60–70 |

| | | | | | |
|-------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|----------|--------------------------------|
| | alcalina | | | | Sistema: 62 |
| PEMFC | membrana polimérica | Hidrógeno | 0,1 a 500 | 70–200 | Celda: 50–70 Sistema: 30–50 |
| DMFC | membrana polimérica | Metanol | 0,001 a 100 | 90–120 | Celda: 20–30 |
| PAFC | Ácido fosfórico | Hidrógeno | Superior a 10 MW | 200 | Celda: 55 Sistema: 40 |
| MCFC | Carbonato Fundido | Hidrógeno, Metano-CH ₄ | 100 MW | 650 | Celda: 55 Sistema: 47 |
| SOFC | Óxido Cerámico | Hidrógeno, CH ₄ , CO | Superior a 100 kW | 600–1000 | Celda: 60–65 Sistema: 55–60 |

De todas estas pilas de combustible, las pilas MCFC y PAFC son las menos utilizadas. Las pilas AFC se han usado para aplicaciones aeroespaciales, pero presentan unas prestaciones y unos costes muy elevados. Los otros tres tipos de pilas (DMFC, PEM y SOFC) serán viables a medio plazo.

Las pilas DMFC presentan la ventaja de utilizar metanol como combustible. Al ser éste un combustible líquido, presenta una alta densidad de energía y, sobre todo, una gran facilidad de manejo, pero como contrapartida poseen una densidad de potencia baja. Estas características las hacen especialmente indicadas para aplicaciones de baja potencia, como dispositivos móviles, donde la potencia no es una variable significativa, pero sí lo es la facilidad de operación.

Las pilas PEM, poseen mayores densidades de potencia. Por otro lado, funcionan a temperaturas relativamente bajas (< 100 °C actualmente), lo que tiene sus ventajas, como son la facilidad de aislamiento y la rapidez de calentamiento. Entre los inconvenientes se encuentra la menor calidad del calor generado. Este compromiso entre prestaciones y facilidad de operación las hacen especialmente indicadas para aplicaciones intermedias, que requieran desde centenas de vatios hasta unas pocas centenas de kilovatios, incluyendo por tanto los vehículos utilitarios.

Finalmente, las pilas SOFC tienen la ventaja de mostrar altas eficiencias y densidades de potencia. A cambio, presentan los problemas asociados a su operación a elevadas temperaturas (> 600°C) como son el aislamiento o el tiempo de arranque. Como consecuencia, están especialmente indicadas para aplicaciones de alta potencia (centenas de kilovatios o algunos megavatios), donde la mejora de la eficacia compensa los problemas de aislamiento. Igualmente, su uso es recomendable en aplicaciones donde puedan operar de forma continuada, como son tanto para la generación en áreas sin conexión a la red de suministro energético o donde no se requiera un arranque rápido.

En resumen, las características que presentan las pilas de combustible las dotan de un gran potencial para múltiples aplicaciones, ya que se trata de energía cuya eficiencia no se ve prácticamente afectada por el tamaño. Esto permite abarcar un amplio intervalo de potencias y por ello en la actualidad se perfilan tanto para aplicaciones estacionarias como para

aplicaciones portátiles. En cuanto a las aplicaciones estacionarias, en la actualidad son de gran interés en plantas de cogeneración para aprovechar tanto la energía eléctrica como la calorífica. En aplicaciones de automoción, esta tecnología provee altos niveles de eficiencia y rápidas respuestas con un mínimo de mantenimiento. En aplicaciones portátiles se presentan como una alternativa a las baterías para todo tipo de aplicaciones, en especial ordenadores y teléfonos móviles. Figura 2.5, [Sharon T. y Zalbowitz M. 2009].

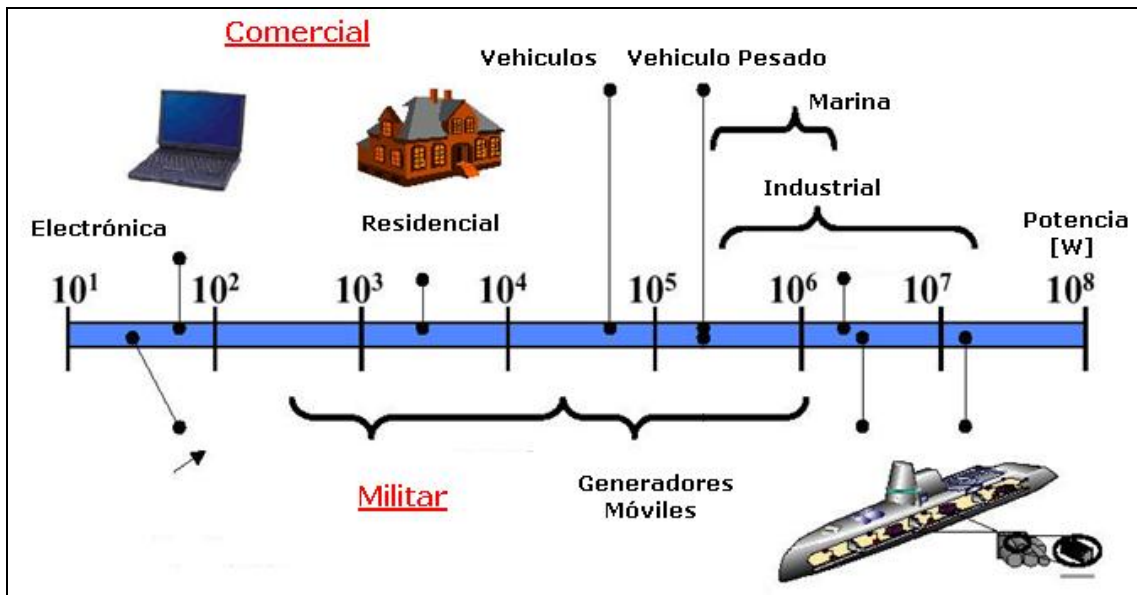


Figura 2.5. Aplicaciones de las pilas de combustible en función de la potencia.

La investigación realizada en esta memoria, se ha centrado en las pilas de combustible de Membrana de conducción Protónica, PEM.

2.1.3. Ventajas y desventajas

Las pilas de combustible son dispositivos de generación de corriente al ser alimentados con combustible. Por ello tienen muchas características en común con las máquinas de combustión interna y con las baterías o pilas convencionales.

Las pilas de combustible son mecánicamente ideales, lo que significa que carecen de partes móviles no generan vibraciones y por ello son altamente silenciosas.

Una característica ecológica fundamental es la escasa producción de gases de efecto invernadero, como: óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), y de emisiones de partículas. Por ello, un sistema de generación de energía basado en pilas de combustible, entrega potencia de forma continua no contaminante y silenciosa.

Las pilas de combustible tienen un intervalo de escalabilidad mucho más amplio que las baterías, desde un vatio en aplicaciones portátiles hasta cientos de miles de vatios en aplicaciones de cogeneración.

De la misma manera que las pilas de combustible presentan interesantes ventajas, también poseen serios inconvenientes frente a sus competidores directos.

La densidad de potencia de una pila de combustible es una limitación significativa, pues aunque han mejorado drásticamente en la última década, aún requieren, mejoras significativas para competir en aplicaciones portátiles y especialmente en el sector del automóvil. En este último sector las máquinas de combustión interna y las baterías, operan muy por encima de la densidad de potencia volumétrica, gravimétrica de las pilas de combustible.

La disponibilidad y almacenamiento del combustible constituye otra desventaja en la aplicación de esta tecnología.

Las pilas de combustible operan mejor con hidrógeno gaseoso, un combustible que no se encuentra disponible de forma libre en la naturaleza y por ello tiene que ser producido, partiendo de compuestos tan elementales y abundantes como el agua y el metano. En la actualidad, la mayor parte del hidrógeno se está produciendo por reformado de hidrocarburos, pero en un futuro esto cambiará al escasear estos recursos. En cambio, la producción a partir de fuentes térmicas (energía solar térmica, energía nuclear de fusión, etc.) resulta especialmente interesante a largo plazo, pues son energías renovables y poseen unos costes inferiores en un 40% a los de la producción electrolítica de hidrógeno a baja temperatura [Tecnalia, 2009].

En cuanto a los sistemas de almacenamiento, los más comunes actualmente son las bombonas de hidrógeno gaseoso a presión y los hidruros metálicos. El principal problema de todos los sistemas de almacenamiento para su aplicación al transporte, u otras aplicaciones móviles, reside en el peso total del sistema, muy superior al del hidrógeno almacenado. En la mayoría de los envases, el peso de hidrógeno es inferior al 2% del total del sistema de almacenamiento.

2.1.4. La pila de combustible y el medio ambiente

Las pilas de combustible son perfectamente compatibles con los requerimientos medioambientales. De hecho, esto constituye su mayor ventaja frente a otras tecnologías de conversión/generación de energía. Sin embargo, el impacto medioambiental de las pilas de combustible depende mucho del contexto de su uso.

Uno de los futuros más prometedores, es el referido a la “economía del hidrógeno”, donde las pilas de combustible de hidrógeno se acoplan con un electrolizador y a la tecnología de energías renovables, eólica y/o fotovoltaica, en un lazo cerrado de energía libre de contaminación. En este sistema las pilas de combustible podrían jugar un papel muy destacado, pues en presencia de sol o viento, la electricidad producida a partir de la energía solar y eólica puede ser usada directamente para suministrar energía a las ciudades, mientras que la producción extra de electricidad de origen renovable se utilizaría para producir hidrógeno, vía electrolisis. Cuando, alguna vez las condiciones climatológicas no favorezcan la existencia de viento o llegue la noche la potencia demandada puede ser suministrada por la pila de combustible mediante la conversión directa del hidrógeno almacenado en electricidad.

Este futuro referido a la economía del hidrógeno se muestra esquemáticamente en la Figura 2.6. En este sistema, los combustibles fósiles se han eliminado.

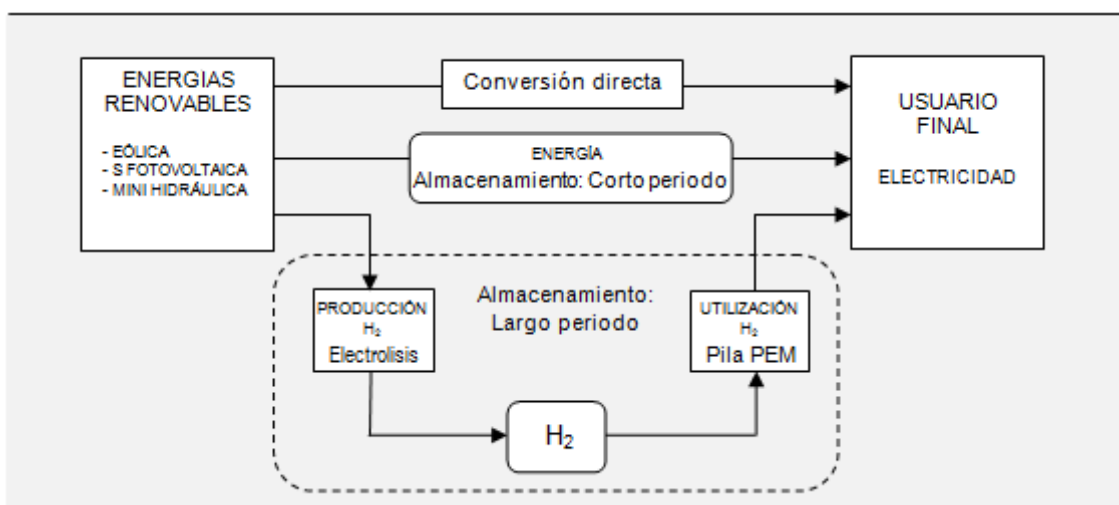


Figura 2.6. Esquema de un futuro basado en la Economía del Hidrógeno.

Aunque actualmente, existen muchos estudios sobre la económica del hidrógeno que difieren en sus detalles, en lo que sí están de acuerdo los expertos es, que la transición hacia la economía del hidrógeno será tan necesario como difícil, costoso y largo.

2.2. Pila de combustible de Membrana Polimérica, PEM

2.2.1. Fundamentos básicos

Una pila de combustible de membrana de conducción protónica basa su funcionamiento en la *oxidación parcial del hidrógeno* en el ánodo y la *reducción del oxígeno* en el cátodo. Desde el punto de vista físico consta de dos cámaras, una de hidrógeno (H₂) y otra de oxígeno (O₂), separadas por un electrolito (membrana de conducción protónica). En ambos lados de la membrana hay un catalizador, en contacto directo con la misma. Las moléculas de hidrógeno se disocian en el ánodo, en presencia del catalizador, generando dos protones (H⁺) y dos electrones (e⁻), la semireacción de oxidación que se produce en el ánodo es conocida como *Reacción Anódica*, Eq.(2.1). Los protones cruzan desde el ánodo hasta el cátodo a través de la membrana y en consecuencia, aparece un mayor potencial eléctrico en el cátodo que en el ánodo, lo que hace que los electrones generados en el ánodo puedan pasar al cátodo a través de un circuito eléctrico externo, al que aportan potencia eléctrica.



Finalmente, en la zona del cátodo, en presencia del catalizador tiene lugar la *reducción del oxígeno*, es decir, los protones que han cruzado la membrana se unen con los electrones que han llegado por el circuito eléctrico externo y el oxígeno presente en la cámara del cátodo, generándose agua y calor como producto final de la reacción electroquímica. Esta reacción es mucho más lenta que la oxidación del hidrógeno y es el verdadero limitador del funcionamiento de la pila. La semireacción de reducción es llamada *Reacción Catódica*, Eq. (2.2).



De forma secuencial, Figura 2.7, los principales pasos que se realizan en el proceso de producción de electricidad dentro de una pila de combustible PEM son los siguientes:

1. Entrada de los gases reactantes dentro de la pila de combustible, transporte del combustible y oxidante.
2. Se produce la reacción electroquímica, reacción parcial anódica y catódica.
3. Conducción iónica a través del electrolito y, conducción electrónica a través del circuito externo.
4. Traslado del subproducto, originado en la reacción electroquímica, desde la pila de combustible hacia el exterior.

La membrana de intercambio protónico suele ser de Nafion, membrana comercial de copolímero de tetrafluoretileno sulfonado.

La conductividad iónica de la membrana depende de múltiples variables:

- temperatura,
- concentración del grupo ácido
- hidratación de la membrana

La membrana debe de estar saturada de agua para permitir el desplazamiento de H^+ . Estas membranas operan a temperaturas entre 60 y 90 °C y a presiones de 0-5 bares. En estas condiciones son muy estables y resistentes, llegando a una vida útil de 4000 h. A temperaturas superiores a 90 °C las membranas no retienen más el agua y no se asegura un transporte conveniente de protones. Un punto clave es el grado de humedad de la membrana, pues debe estar hidratada constantemente. La influencia de la hidratación de la membrana se hace visible para densidades de corriente elevadas, donde la tensión baja considerablemente con una membrana seca [O'Hayre, 2006].

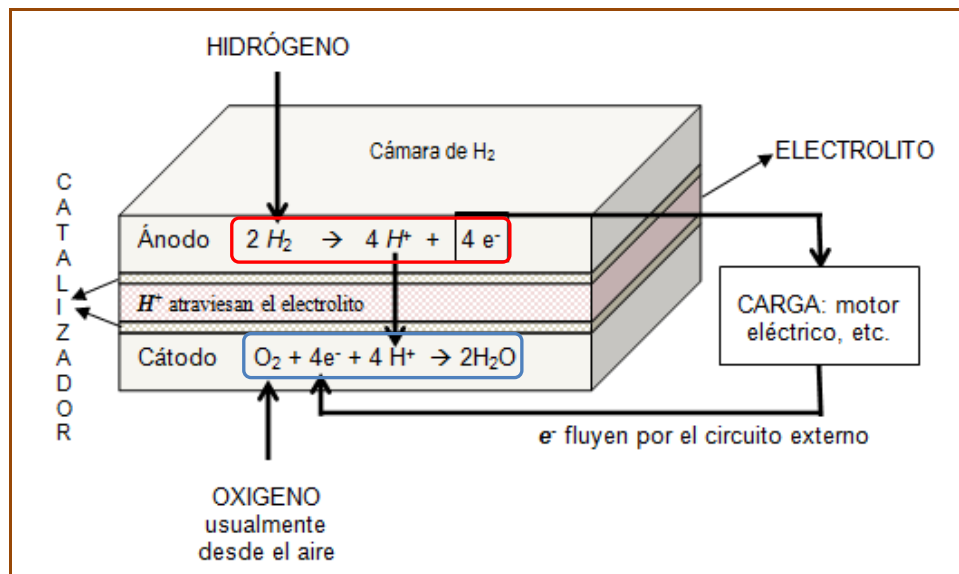


Figura 2.7. Componentes de una celda de combustible PEM.

El catalizador más utilizado en las pilas de combustible es el platino. Se deposita en pequeñas partículas sobre materiales de carbono de elevada superficie específica. En la actualidad, existen muchos grupos de investigación trabajando tanto en nuevas membranas, en su inmensa mayoría poliméricas, como en catalizadores, principalmente, en aleaciones de platino.

2.2.2. Características eléctricas

Mantener un nivel alto de voltaje en la pila de combustible, incluso con altas corrientes de carga, es crítico para la implementación de esta tecnología en la mayoría de las aplicaciones. Desafortunadamente, es difícil de conseguir cuando la pila ésta sometida a variaciones de corrientes en la carga.

En realidad, las pilas de combustible logran mayor voltaje de salida en circuito abierto, y su voltaje disminuye con el incremento de la corriente. La tensión máxima que puede alcanzar una pila de combustible, en condiciones estándares, viene dada por la Ecuación de Nernst (2.3) [14].

$$E^0 = -\frac{\Delta H}{nF} + T \frac{\Delta S}{nF} \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) define la tensión ideal de la pila en función de la temperatura y presión parcial de los reactivos. Ahora bien, el funcionamiento ideal no se consigue debido a pérdidas de tensión durante el proceso de generación de electricidad y por ello la tensión entre sus bornes es inferior a la definida por la ecuación de Nernst. Estas desviaciones del funcionamiento ideal se denominan “sobretensiones o pérdidas de tensión” y la forma característica de representarlas es a través de la denominada *curva de polarización [V-i]*, que constituye el modelo experimental de generación de voltaje en función de la corriente solicitada, Figura 2.8.

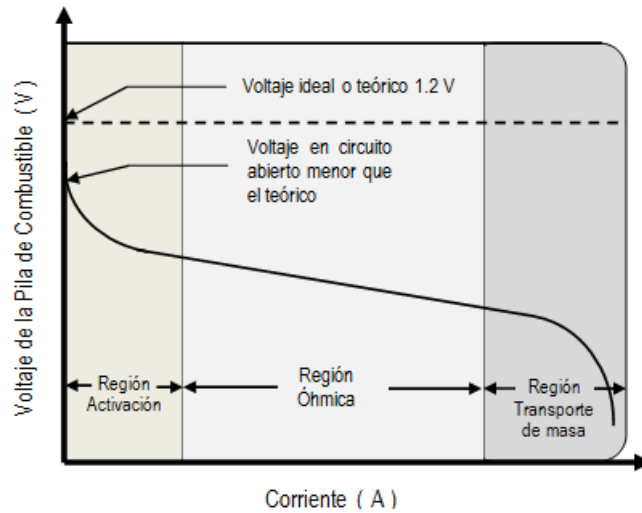


Figura 2.8. Curva V-I de polarización de una pila PEM.

En esta caracterización experimental de una pila PEM, se observan tres tipos de pérdidas de tensión:

- *Sobretensión de activación.*- Pérdidas debidas a la cinética intrínseca de la activación de los reactivos en la superficie del electrodo (catalizador). Se producen a valores bajos de intensidad de corriente. Las pérdidas de activación siguen un comportamiento de acuerdo a la “ecuación de Tafel”, Eq. (2.4).

$$\eta_{act} = \frac{RT}{n\alpha F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2.4)$$

- *Sobretensión de resistencia o caída óhmica.*- Ocasionadas por la resistencia que opone el electrolito (membrana protónica) al paso de los iones. Esta caída óhmica tiene un comportamiento lineal [R_{res}].
- *Sobretensión de saturación.*- Se produce a altas densidades de corriente donde se origina una caída brusca de la tensión debido a los límites impuestos por el transporte de masa, esta sobretensión también es conocida como caída de voltaje por transporte de materia o pérdida por concentración, [η_{con}] y se modela mediante la ecuación de Nernst. [7], Eq. (2.5).

$$\eta_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (2.5)$$

En resumen, el comportamiento eléctrico de la pila de combustible se modela experimentalmente mediante la curva de polarización [V-i]. El modelo teórico viene descrito en la Eq. (2.6), donde el voltaje de la pila es igual al voltaje termodinámico E^0 menos el valor de las caídas de voltaje debido a las sobretensiones.

$$V = E^0 - \left[\frac{RT}{n\alpha F} \ln \frac{i}{i_0} \right] - [i \cdot r] - \left[\frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \right] \quad (2.6)$$

El rendimiento eléctrico de la pila de combustible puede determinarse a partir de sus características eléctricas voltaje-corriente (curva de polarización). Las pilas de gran tamaño

generan, obviamente, una corriente superior a las de menor tamaño. A fin de comparar los resultados eléctricos se impone un proceso de normalización de la corriente con respecto al área de reacción electroquímica de la pila, esto es, se realiza la comparación en términos de:

- Densidad de corriente (*amperios por centímetros cuadrados*)
- Densidad de potencia (*voltaje por densidad de corriente, en cada punto de la curva [V-i], Figura 2.9.*)

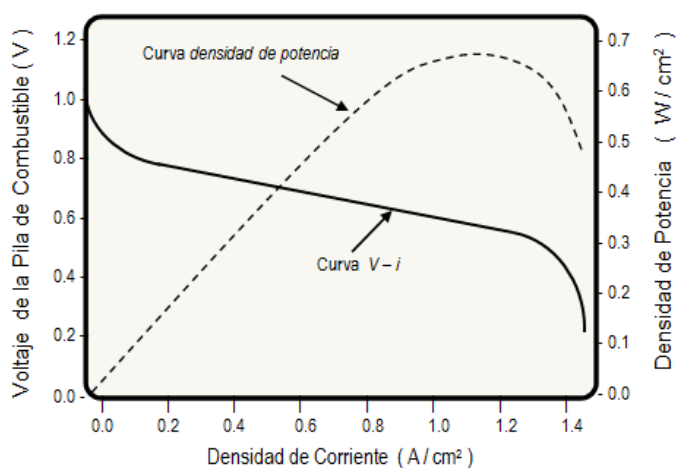


Figura 2.9. Representación del comportamiento eléctrico de una pila: Curva de polarización V-i y densidad de potencia.

En la Figura 2.9, se aprecia como la densidad de potencia de la pila de combustible aumenta con la densidad de corriente hasta alcanzar un valor máximo, y disminuye para valores altos de la densidad de corriente.

2.2.3. Técnicas de caracterización

La caracterización experimental y el modelado teórico de las pilas de combustible constituyen los pilares básicos para el progreso de esta tecnología tanto a nivel de investigación básica como aplicada, en dominios industriales y de laboratorio.

Dentro de los métodos experimentales de caracterización del comportamiento eléctrico de las pilas de combustible se encuentran dos tipos de técnicas:

- Técnicas de caracterización “ex situ”.- Permiten conocer de manera detallada la estructura o características de un componente individual. Generalmente, es preciso retirar solamente el componente desde su ubicación dentro de la pila de combustible.
- Técnicas de caracterización electroquímica “in situ”.- Estas técnicas de caracterización electroquímica utilizan las variables de voltaje, corriente y tiempo para caracterizar el comportamiento eléctrico de una pila PEM en diferentes condiciones de

operación. Estas técnicas se han utilizado en los trabajos de investigación presentados en la Tesis.

A continuación se describen con detalle, las principales técnicas de caracterización “in situ”, utilizadas en el modelado experimental de la operación de una pila de combustible:

▪ **Curva de polarización V-i.**

Una de las representaciones que más información relevante proporcionan del comportamiento eléctrico de una pila PEM, es la caracterización mediante la denominada curva de polarización V-i. La curva de polarización V-i muestra el voltaje de salida de una pila de combustible frente a valores de la corriente eléctrica demandada por la carga y en unas condiciones experimentales fijas de las variables de estado:

- Caudal de H₂ y de O₂
- Presión,
- Temperatura
- Humedad.

La representación del modo de operación de la pila mediante la curva de polarización V-I permite realizar una evaluación cuantitativa del comportamiento eléctrico global de la pila PEM. A partir de la misma se obtienen parámetros relevantes como:

- Corriente de cortocircuito I_{cc}
- Voltaje de circuito abierto V_{co} de la pila PEM

Ambos parámetros son fundamentales en la detección de estado propuesta en esta memoria.

Las variables que intervienen en esta técnica son: voltaje (V), corriente (i) y tiempo (t). La corriente y el voltaje en la pila PEM están íntimamente relacionados, por lo que es imposible variarlas independientemente una de la otra en el mismo instante de tiempo. Si se fija control de voltaje, entonces la electroquímica de la pila de combustible determina el valor de la corriente. Contrariamente si se fija el control de la corriente, la electroquímica de la pila de combustible determina el valor del voltaje. Las curvas V-i se obtienen mediante sistemas resistivos, generalmente escalones de resistencias. Estos sistemas imponen una corriente fija en el tiempo a la pila de combustible y miden el valor en el estado estable del voltaje generado por la pila después de un período de estabilización, o bien se mantiene fijo en el tiempo el voltaje de la pila y se mide el valor de la corriente en estado estable.

▪ **Espectroscopia de impedancia compleja (EIC).**

Una de las técnicas más relevantes utilizada en los últimos años para caracterizar el funcionamiento y comportamiento eléctrico de las pilas de combustible lo constituye la espectroscopia de impedancia compleja, EIC. Este método electroquímico permite la caracterización de propiedades eléctricas de materiales y de sus interfaces con electrodos, a partir de un conjunto de impedancias obtenidas a distintas frecuencias. Se trata de medir la

relación entre las amplitudes de tensión e intensidad y la relación entre las fases de las mismas, en distintas frecuencias.

Para ello se somete al sistema que se va a analizar, a una tensión sinusoidal de una determinada amplitud y frecuencia, y se mide la respuesta de intensidad. El procedimiento también se puede hacer fijando una intensidad sinusoidal y obteniendo la tensión como consecuencia. La impedancia de un sistema puede por lo tanto expresarse en términos de una magnitud de impedancia Z_0 y una fase ϕ , o de una componente real Z_{real} y una componente imaginaria Z_{imag} .

$$Z_{real}(t) = Z_0 \cos \phi \quad (2.7)$$

$$Z_{imag}(t) = Z_0 \text{sen} \phi j \quad (2.8)$$

Normalmente, los datos de impedancia se representan gráficamente en términos de la componente real e imaginaria (Z_{real} sobre el eje X, y Z_{imag} sobre el eje Y), y se denomina *Diagrama de Nyquist*, Figura 2.10.

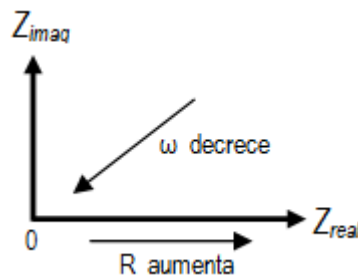



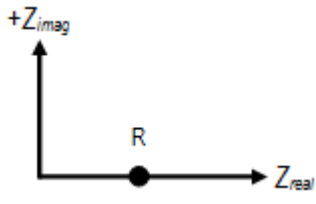

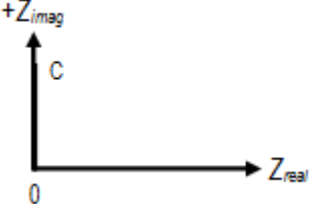
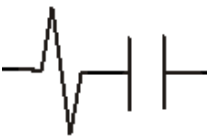
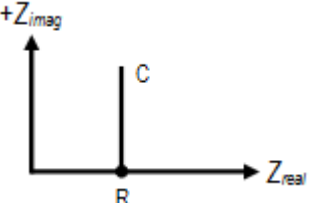
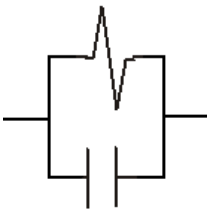
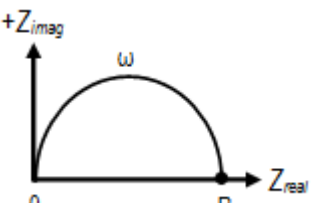
Figura 2.10 Representación de la impedancia: gráfica de Nyquist.

Los valores de los componentes hallados de esta manera se corresponden, directa o indirectamente, con valores de parámetros eléctricos o electroquímicos del componente. En las pilas de combustible se pueden determinar:

- Resistencia de la membrana
- Limitaciones de difusión
- Resistencia de contacto entre los electrodos y la membrana
- Capacidad de la interfase electrodos-membrana

La Tabla 2.2, resume brevemente la forma de representa en el diagrama de Nyquist los circuitos equivalentes de impedancias más importantes. La representación de una *resistencia pura R*, es el caso más simple, ya que la componente imaginaria es cero y la impedancia no cambia con la frecuencia. La representación gráfica para una resistencia es un solo punto sobre el eje real (eje X) con un valor R. La *capacitancia pura C*, se representa como una línea vertical que disminuye al aumentar la frecuencia ω , y la componente real de la impedancia es cero. La representación de una impedancia de un capacitor y una resistencia en serie (*serie RC puro*), es línea vertical en la parte imaginaria donde la componente real viene dada por el valor de la resistencia. Mientras que para un circuito equivalente formado por el *paralelo RC puro*, la representación gráfica en el diagrama de Nyquist es un semicírculo.

Tabla 2.2. Representación de impedancias en el diagrama de Nyquist.

| Elemento | Circuito equivalente | Diagrama Nyquist |
|---|---|---|
| Resistencia pura $Z = R$ |  |  |
| Capacitancia Pura $Z = \frac{1}{j\omega C}$ |  |  |
| Resistencia - capacitancia serie $Z = R + \frac{1}{j\omega C}$ |  |  |
| Resistencia - capacitancia paralelo $Z = \frac{1}{j\omega + \frac{1}{RC}}$ |  |  |

En resumen, la EIC es una técnica de caracterización de pilas de combustible que permite distinguir entre las pérdidas de tensión óhmicas, de activación y de concentración de la pila PEM. Como contrapartida, los resultados que se obtienen son difíciles de interpretar y requiere un largo periodo de tiempo en el cálculo de resultados, lo cual la desaconseja para ser utilizada en tiempo real en el control autónomo de estados de una pila PEM.

Esta técnica de caracterización se ha utilizado en el análisis y modelado del comportamiento de una pila PEM y los resultados se describen en el Capítulo 3.

▪ **Interrupción de corriente.**

El método de interrupción de corriente permite también obtener gran parte de la información proporcionada por la espectroscopia de impedancia compleja. Ahora bien, los resultados obtenidos no son tan precisos o detallados como en el caso anterior. Sin embargo, el método de interrupción de corriente también denominado salto de carga, presenta ventajas en relación a la técnica de medida de impedancia compleja:

- La interrupción de corriente tiene una rápida respuesta, por lo que puede ser utilizada en tiempo real.
- El hardware requerido para la obtención de resultados es mucho más simple.
- Puede ser implementado en sistemas de pilas de combustible de alta potencia, lo que no era posible con el método de impedancia compleja.
- Puede realizarse en paralelo con la medida de la curva de polarización V-i.

Por estas razones, la técnica de interrupción de corriente ha encontrado una amplia aceptación en la investigación de las pilas de combustible PEM, en la caracterización tanto de monoceldas como de grandes pilas.

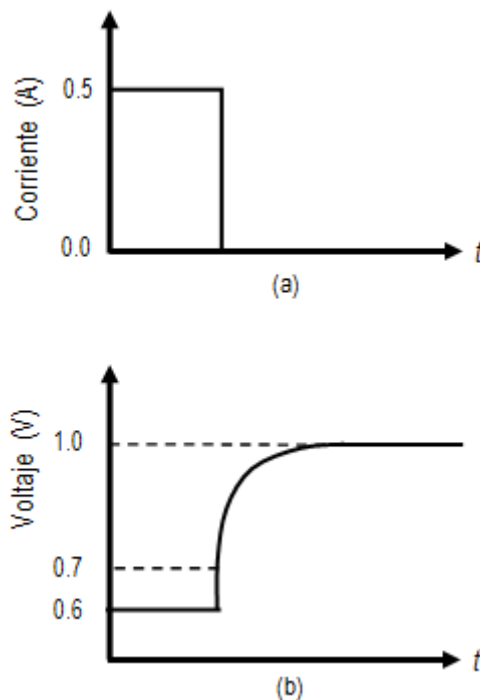


Figura 2.11. Medida de interrupción de corriente. (a) Perfil hipotético de la corriente de carga aplicada a una pila PEM. (b) Hipotética respuesta en el tiempo del voltaje de una pila cuando se aplica la interrupción de corriente.

La idea básica que subyace a la técnica de interrupción de corriente se ilustra en la Figura 2.11. Así, cuando una corriente de carga constante en un sistema de pilas de combustible se interrumpe abruptamente, Figura 2.11a), el tiempo resultante en estabilizarse la respuesta del voltaje, es representativo al comportamiento capacitivo y resistivo de varios componentes de la pila de combustible. La recuperación instantánea en el voltaje, Figura 2.11b) se asocia con la pérdida óhmica en el sistema. Mientras que la recuperación en el tiempo del voltaje se relaciona con las pérdidas de activación y transporte de masa en el sistema.

En resumen, este método permite separar la contribución de los procesos óhmicos y no óhmicos que intervienen en el rendimiento de una pila de combustible. La técnica de interrupción de corriente es mucho más versátil, sencilla y rápida en la obtención de resultados, y además, puede utilizarse con pilas de combustible de alta potencia “stack”.

Presenta otra gran ventaja en la automatización de los procesos de medida en pilas de combustible: fácil implementación de la medición, en paralelo con la de la curva de polarización **V-i**.

En este trabajo, se utiliza el principio de funcionamiento de esta técnica para el estudio y determinación del estado de operación de una pila PEM, Capítulo 5.

2.2.4. Medida y control en pilas PEM

- **Instrumentación y medida en monoceldas.**

La pila de combustible PEM es un dispositivo electroquímico que conceptualmente es sencillo, sin embargo, la investigación para conseguir mejoras en el funcionamiento de la misma es compleja. Esto por un lado, se necesitan equipos costosos para: la medida de las variables electroquímicas de la pila, sistema resistivo o carga variable, generador de onda y analizador de impedancia.

Los dispositivos resistivos disponibles comercialmente permiten un amplio intervalo de variación de la resistencia durante la experimentación, incluyendo la medida de la curva característica **V-i**, sin embargo son difícilmente ampliables e integrables con otros sistemas. Mientras que, la espectroscopia de impedancia compleja requiere de un analizador de impedancia integrado o de una unidad adicional resistiva, lo que incrementa el coste de estos dispositivos y la dificultad de utilizarlos en la operación en tiempo real de la pila PEM.

Además, de la instrumentación de medida de las variables electroquímicas es indispensable un sistema para monitorización y control de las variables de estado de la pila PEM. La Figura 2.12, presenta el diagrama de una estación o sistema experimental básico utilizado para la caracterización y medida “in situ” de una pila PEM, que permitiría la regulación de las variables: presión, temperatura, humedad y flujo de gases, hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, la mayoría de estos sistemas comerciales de medida, como el referenciado en [Besel, 2010], no incluyen un dispositivo resistivo o carga electrónica. El rendimiento de una pila PEM depende considerablemente de las condiciones de operación, por ello un control flexible de las mismas permite mantener al sistema en operación óptima.

Un sistema experimental para pequeñas pilas de combustible (monoceldas) como el mostrado en la Figura 2.12, permitiría una experimentación conducente a la caracterización de pilas de combustible.

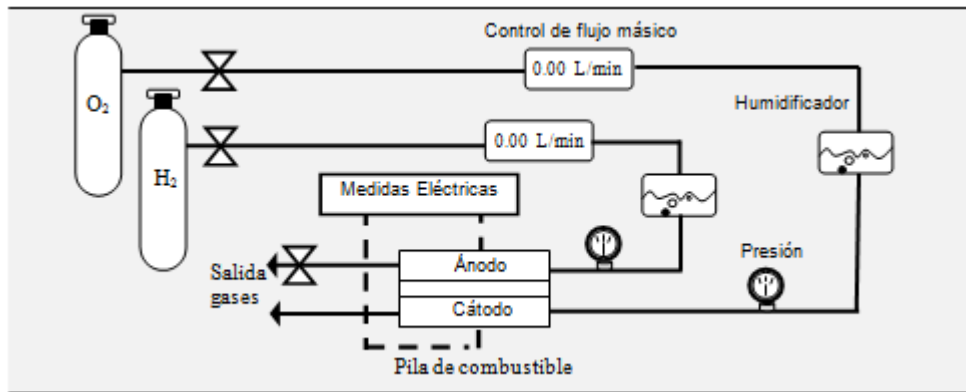


Figura 2.12. Estación experimental básica para una Pila de Combustible.

▪ **Medida y control en stack.**

Ante aplicaciones concretas, se diseña una pila para que alcance la intensidad y potencia eléctrica necesaria, (stack). Los módulos extras necesarios para mantener operando un “stack” de celdas depende en gran parte de su potencia generada y el combustible utilizado. En la mayoría de las aplicaciones con “stack” de celdas se incluyen módulos de: suministro de combustible, recuperación del calor y regulación de la potencia eléctrica generada y un sistema de monitorización, por nombrar unos pocos. A menudo, estos módulos pueden tomar mayor espacio y coste que el propia stack de celdas de combustible, algunos investigadores suelen llamarles “equipos de potencia parásita”.

En resumen, la utilización de una pila PEM como generador eléctrico (y térmico en muchas aplicaciones) es compleja, y todos los elementos que en ella intervienen para su correcta operación requieren un sistema de medición y control integrados que garanticen su operación óptima, especialmente si se necesita gestionar tanto la energía eléctrica generada como la energía térmica. Figura 2.13.

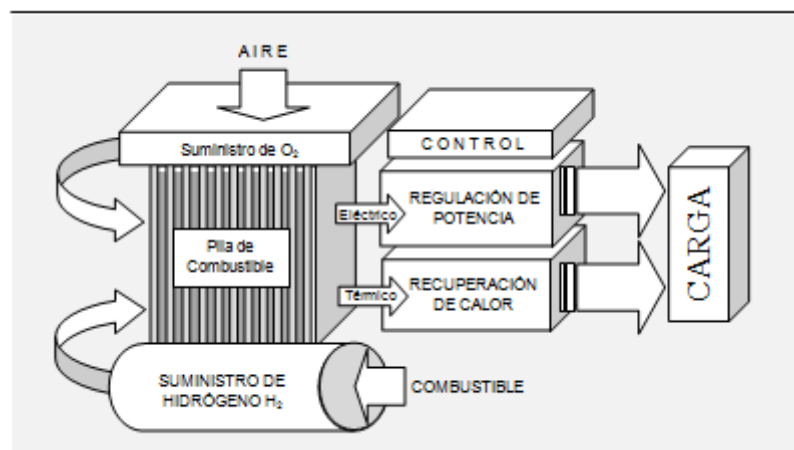


Figura 2.13. Diagrama de módulos para un stack de pilas de combustible PEM.

Solo algunos de los últimos sistemas de pilas PEM comerciales, como:

- Nexa de 1,2kW de Ballard.
- Gencore de 5kW de PlugPower.
- HyPM de 8kW eléctricos y 10 kW térmicos de Hydrogenic.

Disponen ya de un sistema de control propio adaptado a la pila. Se trata de sistemas de control embebidos en una ECU, que incluyen tanto el control como la monitorización de ciertas variables de la pila. Estos sistemas tienen el inconveniente de falta de flexibilidad, pues se diseñan para uno o varios modelos de pila, pero no para cualquier pila. De hecho, el control se realiza de forma prefijada, sin posibilidad de variar los valores de referencia. La mayoría no incluye un conjunto de programas para visualización y control de ciertas variables que permitan optimizar ya sea la potencia eléctrica entregada por la pila o minimizar el combustible utilizado.

▪ Técnicas avanzadas de control en pilas.

En la actualidad, las pilas de combustible PEM se han convertido en el principal dispositivo de investigación, desarrollo y aplicación en los últimos años, tanto a nivel académico como industrial, debido principalmente a las numerosas ventajas de esta tecnología. Las pilas PEM presentan muchas aplicaciones, especialmente en sistemas de cogeneración de energía de baja potencia (sistemas distribuidos).

Así, en el trabajo realizado por Asad Davari [Abshishek S. y Asad D, 2004], presenta el control de la potencia generada por un stack de pila de combustible en el suministro de energía eléctrica para un sistema autónomo (sin conexión a red) y con conexión a red. Utiliza técnicas de control borroso (fuzzy) para el disparo ON-OFF de los dispositivos electrónicos en la regulación de la potencia suministrada por la pila PEM, lo cual permite el diseño y optimización de la unidad de acondicionamiento de potencia eléctrica a la salida del voltaje generado por la pila de combustible hacia la carga. Existen otros trabajos en los que se utilizan algoritmos genéticos para optimizar el tamaño de sistemas autónomos de energía (sistemas sin conexión a red), como el presentado por Eftichios Koutroulis, Dionissia Kolokotsa en [Eftichios K., 2006].

En [Khaled M., 2009] se modela un sistema de generación de energía basado en pilas PEM, el modelo incluye, un stack, reformador de combustible y un inversor DC/AC. En el modelo se emplea un controlador Fuzzy para gestionar el combustible en función de los consumos de carga eléctrica. También, en [Hankache W., 2009] se utiliza un controlador Fuzzy para estabilizar la potencia eléctrica suministrada a la carga. El sistema de generación de energía consta de un stack PEM y un banco de ultracapacitores.

Las técnicas de control incorporadas por estos sistemas están centradas en los periféricos de la pila de combustible y no tanto en el funcionamiento de la pila PEM para mejorar su operación y rendimiento.

2.2.5. Ventajas, fronteras y limitaciones

Las pilas PEM, resultan adecuadas para aplicaciones de potencia media y media-baja: vehículos ligeros, viviendas e incluso en las aplicaciones portátiles de mayor potencia, como es el caso de las videocámaras. Sus principales ventajas son: alta densidad de potencia y rápida respuesta. En la Figura 2.14, se muestra la curva de polarización de una pila de combustible PEM [DLR. 2011]:

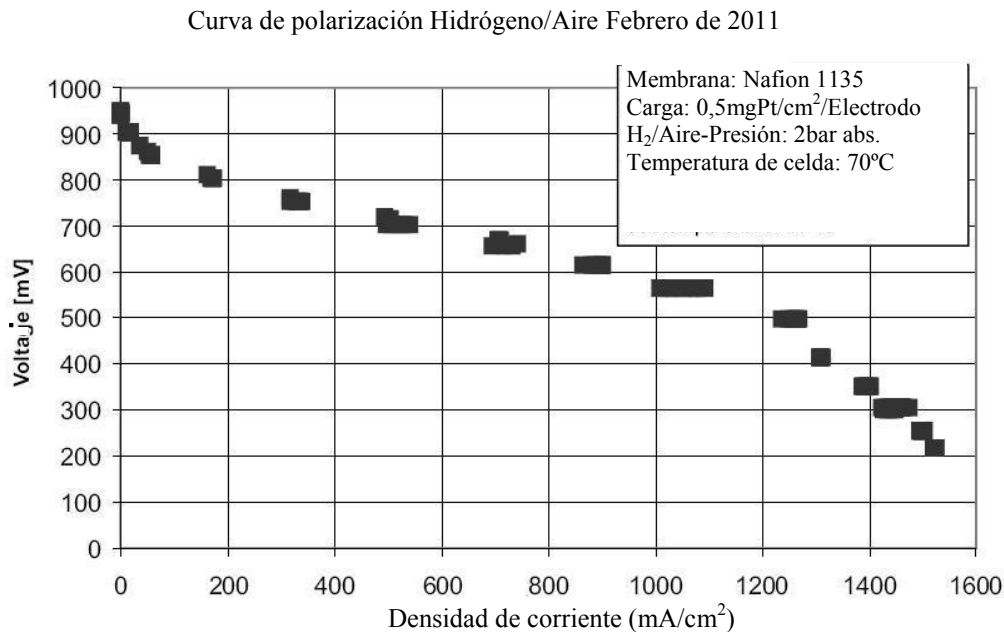


Figura 2.14. Curva de polarización medida en el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

La gráfica muestra la alta densidad de corriente y de potencia que presentan las pilas PEM, con valores superiores a 600 mW/cm², proporcionando un elevado cociente potencia-volumen. Igualmente, dado que el peso de la membrana y los electrodos es muy reducido, del orden de varias decenas de miligramos por centímetro cuadrado, si se consiguiese reducir el peso del resto de los componentes de la pila, se podrían conseguir elevadas relaciones peso-potencia.

En cuanto a su potencia, se han conseguido unidades superiores a cien kilowatios, entre ellos un sistema de Ballard de 250kW de potencia nominal. Estas ventajas han hecho que este tipo de pilas haya sido elegido para alimentar distintos modelos de vehículos. La mayoría de ellos, se encuentran todavía en desarrollo, pero hay ya alguno en funcionamiento, como el Honda FCX o el HYUNDAI IX35 FCEV. Este último es tan silencioso, que cuando se va a menos de 20 km/h emite un ruido para evitar atropellos.

Al igual que otras pilas de combustible, las pilas PEM pueden ser utilizadas para cogeneración, es decir, se trataría de aprovechar no sólo su potencia eléctrica, sino también su calor residual. Un ejemplo lo constituye el sistema Mark1030 de Ballard [Ballard, 2010], pensado para generación eléctrica y calentamiento de agua doméstica, que consigue una eficiencia energética combinada del 70-80%, lo que permite una reducción de un 20-30% del consumo de energía primaria.

A pesar de que las pilas de combustible PEM son las más estudiadas, todavía existen problemas para su implantación en el mercado. Algunos de estos problemas no están asociados directamente a la tecnología de las pilas, como son:

- la creación de una infraestructura adecuada de suministro y almacenamiento de hidrógeno
- la aceptación social del hidrógeno como combustible.

Otras dificultades, en cambio, sí tienen que ver con la propia tecnología de las pilas PEM. Entre ellas cabe destacar el peso y, sobre todo, el coste por unidad de potencia. Este coste es especialmente alto para pequeñas producciones, como las que se utilizan en los laboratorios de investigación o en productos muy específicos.

A continuación se exponen los distintos retos que afrontan, en la actualidad, las pilas de combustible de tipo PEM.

Coste.

La principal limitación para la implantación actual de las pilas de combustible PEM es su elevado coste, varios centenares de euros por kilovatio, frente a los 20-50 €/kW de los motores de combustión. Para que sean comercialmente competitivas, se necesitaría reducir los costes a 20-30 €/kW [Rose R., 2009]. El coste se hace especialmente notorio en los prototipos de laboratorio o en las pequeñas series, donde se superan los mil euros por kilovatio. En la actualidad, el coste de una pila Horizon de 1 kW es 4.800€. Esto se debe a que el coste y el tiempo de desarrollo por pila a pequeña escala resultan muy elevados, en gran parte por el método artesanal de fabricación que incluye el mecanizado de las placas bipolares.

Eficiencia.

Por otro lado es preciso considerar que la eficiencia de una pila PEM crece notablemente cuando disminuye la relación entre la potencia demandada y la potencia máxima del dispositivo. Por ello el coste de las pilas es un factor de doble importancia ya que afecta al ámbito económico de su difusión en diferentes aplicaciones y también a la posibilidad de sobredimensionar el dispositivo, si el coste fuese reducido, para ganar en eficiencia en el uso del combustible.

Potencia/peso.

Otro de los aspectos problemáticos en las pilas de combustible de tipo PEM es su relación potencia-peso, usualmente en el intervalo de 100 a 400 vatios por kilogramo. Este valor es demasiado bajo para algunas aplicaciones, como las aeronáuticas y especialmente desfavorable para otras, como la automoción. Este peso proviene, principalmente, de los componentes auxiliares, no activos, como son las placas bipolares y los sellos.

Durabilidad.

La durabilidad es otro factor relevante, asociado, principalmente, a la membrana. Se han conseguido membranas con prestaciones superiores a las de Nafion, pero con durabilidad excesivamente baja. En el Nafion, la durabilidad es de varios miles de horas. Ion Power garantiza una durabilidad superior a 2.000 horas [Ion Power, 2010]. Estos valores ya se aproximan a los que se necesitarían en un vehículo utilitario, 5.000-10.000 horas de

operación, pero aún están lejos de los valores necesarios para aplicaciones continuas, 50.000-100.000 horas de operación.

Gestión del agua

Un punto clave en las pilas de tipo PEM es la gestión del agua. Debe conseguirse un grado de humedad suficiente para que la membrana tenga una buena conductividad protónica, pero no excesivo, para evitar que se inunden los electrodos y se dificulte el acceso de los gases a los puntos de reacción. Esto, unido al hecho de que la generación de agua en la pila es variable, al ser proporcional a la corriente eléctrica que genera, hace de la gestión de agua un asunto complejo. Por ello en el presente trabajo se propone una técnica de fácil utilización y aplicación en tiempo real que permite resolver con cierto éxito la gestión del agua.

Control en pilas PEM

En los últimos años los avances tecnológicos sobre inteligencia artificial y arquitecturas de organización del conocimiento y control se han centrado, en muchos casos, para aplicaciones de Robótica, dotando a los sistemas de mecanismos de decisión y respuestas reactivas adecuadas para afrontar situaciones imprevistas. En esta memoria se propone el desarrollo de una arquitectura para la organización del conocimiento, donde se distinguen módulos o agentes de percepción y control organizados en niveles de competencia con el objetivo de mejorar y optimizar el funcionamiento de una pila de combustible PEM.

CAPÍTULO 3

Análisis de la pila PEM en modo simétrico

El objetivo del presente estudio es detectar las variaciones producidas en el grado de humedad de la membrana de la pila de combustible PEM ante cambios en las variables de estado, cuando a la pila de combustible se le suministra el mismo gas en ánodo y cátodo, *modo simétrico*. Al tratarse de condiciones de modo simétrico, el funcionamiento de la pila no lleva asociado la reacción electroquímica de producción de energía y agua como subproducto, lo que garantiza que los cambios observados en el grado de humedad de la membrana de la pila se deben exclusivamente a los cambios efectuados en las variables de estado. Con este análisis se pretende obtener un modelo de circuito eléctrico equivalente de la pila de combustible PEM para el diagnóstico *off line* del estado de operación de la misma. A partir del modelo, se estudia el efecto que las variables de estado de la pila de combustible, como: la temperatura y grado de humidificación de los gases inyectados a la pila producen sobre el parámetro R_m (resistencia de la membrana) del circuito equivalente.

En la primera parte de este capítulo se detalla el diseño y realización de una monocelda tipo PEM como elementos representativos de todos los ensayos realizados. Mientras que, en la segunda se modela el funcionamiento eléctrico de la misma mediante Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC) y se analiza la influencia de las variables de estado en el grado de humedad de la membrana, aspecto fundamental para el correcto funcionamiento de una pila.

3.1. Monocelda tipo PEM

Dado que en todos los elementos de la monocelda tipo PEM que se han realizado y ensayado se preveían unas potencias limitadas a 10W, lo que no se considera necesario incorporar un sistema de refrigeración en las monoceldas. La transmisión de calor hacia el exterior y, sobre todo, el flujo de gases se consideran suficientes para refrigerar la pila.

Una de las características más relevantes del diseño de la monocelda tipo PEM es la utilización de láminas corrugadas de acero inoxidable como placas bipolares (Ref. Patente [Guinea D. 2010]). Las láminas se prepararon con una máquina de corrugar diseñada y construida al efecto en el Laboratorio de Energías Renovables e Hidrógeno del Centro de Automática y Robótica, formada por dos cilindros con dientes sinusoidales tallados. Las láminas corrugadas son de acero inoxidable de 0,1 mm, para electrodos cuadrados de 5 cm², Figura 3.1.



Figura 3.1. Lámina de 0,1mm de espesor parcialmente corrugada.

La ventaja que presenta la utilización de estas láminas corrugadas con respecto a otros tipos de placas bipolares es la facilidad de fabricación, una vez construida la matriz de fabricación, las laminas son fabricadas en cortos periodos de tiempo. Sin embargo, la fabricación de placas bipolares de grafito o acero inoxidable como la presentada en la Figura 3.2, hace necesario la utilización de máquinas de mecanizado con control numérico y de personal altamente cualificado lo que incrementa su tiempo y coste de fabricación.

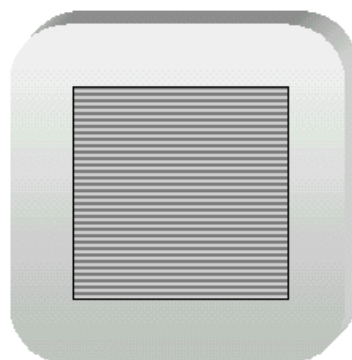


Figura 3.2. Placa bipolar de acero inoxidable.

La Figura 3.3, muestra de forma esquemática los componentes de la mitad superior de una monocelda, siendo simétricos, respecto a la membrana, los de la capa inferior. El ensamblaje electrodo-membrana suele realizarse por prensado en caliente y se denomina MEA (Membrane Electrode Assembly). La superficie de los electrodos coincide con la de las láminas corrugadas y ambos se encuentran dentro de los selladores (marco de Teflón con entrada y salida de gases), mientras que la membrana sobre sale actuando también como sello.

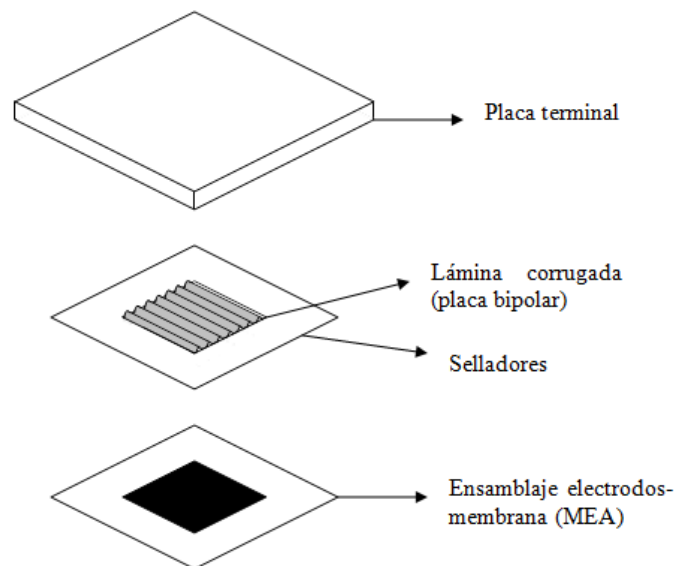


Figura 3.3. Componentes de la zona superior de una monocelda

Cada uno de los componentes de la pila PEM tiene una función en la pila de combustible:

- *Puntos triples de reacción*, esto es: los electrodos que están formados de partículas de platino nanométricas sobre carbón activo extendido por una superficie (tela de carbón) y la membrana de Nafion. En ellos tienen lugar las reacciones electroquímicas.
- *Membrana*. Transporta los protones que cruzan del ánodo al cátodo.
- *Capas difusoras y láminas corrugadas*. Se encargan de permitir que los reactivos (gas anódico y catódico) lleguen a los puntos triples de reacción, y que los electrones lleguen a ellos o salgan de ellos. Por tanto, tienen a la vez conductividad electrónica y deben permitir el paso de agua y de los gases reactantes.
- *Chapas de conexión*. Se encargan de comunicar eléctricamente las láminas corrugadas con el exterior.
- *Elementos exteriores auxiliares* (Teflón, selladores o/y siliconas). Sellan los compartimentos de gases y marcan con su forma la distribución de éstos por las láminas corrugadas.
- *Placas terminales*. Cierran todo el conjunto a presión, asegurando el contacto eléctrico entre los componentes interiores (electrodos, corrugadas y chapas de conexión) y el contacto mecánico entre los componentes exteriores, para asegurar así el sellado.

La Figura 3.4 muestra un esquema, corte transversal, de todos los componentes de la pila de combustible PEM de láminas corrugadas, diseñada. De fuera hacia dentro, se encuentran los siguientes componentes: placas terminales, sellos, marcos de teflón, sellos y ensamblaje electrodo-membrana con prensado en caliente.

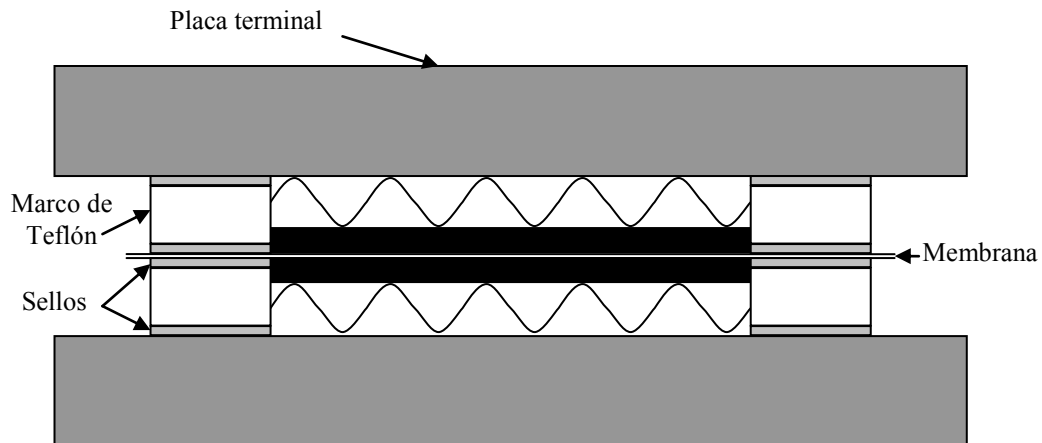


Figura 3.4. Componentes de la monocelda PEM utilizada en esta tesis: corte transversal.

Aunque en el esquema se presenten las dos láminas corrugadas en paralelo para poderlas identificar con mayor facilidad, en realidad tienen los canales perpendicularmente, dando lugar a un flujo de gases cruzado y a una mayor rigidez mecánica. De esta forma se evita que los picos de una lámina corrugada encajen parcialmente con los canales de la otra y deformen el ensamblaje electrodos-membrana, que se encuentra entre ambas. En la Tabla 3.1, se muestran las dimensiones y espesores de los distintos componentes utilizados.

Tabla 3.1 Espesor y dimensiones de los componentes de la monocelda

| Componente | Espesor (mm) | Superficie (mm) |
|----------------------|--------------|-----------------|
| Placas terminales | 15 | 80x80 |
| Sellos | 0,22 | 50x50 |
| Marcos de Teflón | 0,8 | 50x50 |
| Láminas corrugadas | 1,15 | 22x22 |
| Electrodos | 0,35 | 22x22 |
| Membrana: Nafion 115 | 0,127 | 55x55 |

En la Figura 3.5 se muestra una imagen del ensamblado final de una de las monoceldas PEM construida. En el montaje se han considerado todos los requisitos necesarios para garantizar la estanqueidad de la monocelda; imprescindible para conseguir un comportamiento eficaz de la misma.

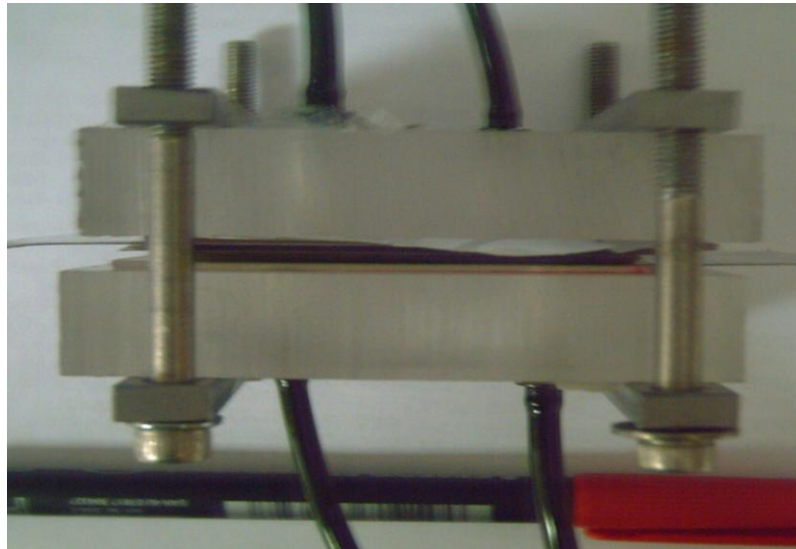


Figura 3.5. Monocelda PEM ensamblada.

3.2. Modelado de la monocelda PEM en modo simétrico

3.2.1. Proceso de caracterización mediante EIC

En un “interface” o superficie de contacto entre distintos medios cualesquiera, las propiedades físicas, mecánicas, la composición del medio y en particular las propiedades eléctricas, cambian precipitadamente y se producen polarizaciones y distribuciones heterogéneas de carga que reducen la conductividad eléctrica total del sistema. La Espectroscopia de Impedancia Compleja (EIC) se ha convertido en una herramienta muy usada en la investigación en la dinámica de fronteras, o de las cargas móviles en las interfaces de cualquier tipo de material sólido o líquido.

Un objetivo básico de la EIC en la caracterización de las pilas de combustible, consiste en determinar las propiedades del sistema electrodo-material, sus interrelaciones, y sus dependencias con variables controlables como son la temperatura, la humedad de los gases, la presión parcial del oxígeno y del hidrógeno. De hecho, en [Freire, T., 2000] se analiza mediante EIC monoceldas tipo PEM con membranas de Nafión de distinto grosor (112-117 μm) en modo asimétrico, esto es, con H_2/O_2 variando las condiciones de humidificación de los gases reactantes. Se señala que la conductividad de la membrana está directamente relacionada con el agua contenida en la pila y que depende del agua transportada por los gases humidificados y generada por la reacción de la pila en el cátodo. En [Ciureanu M., 1999] se estudia mediante EIC el efecto del monóxido de carbono (CO) en una monocelda de Nafión 112. En este trabajo se describen medidas con la pila funcionando en “modo simétrico”, es decir inyectando hidrógeno en ambas zonas de los electrodos. El comportamiento eléctrico de

la pila describe una combinación en serie de la resistencia de la membrana y dos circuitos idénticos, uno para cada interface electrodo–membrana.

▪ Señal eléctrica de estímulo.

Para la medida de $Z(\omega)$ se ha utilizado un medidor comercial HP 4192A LF Impedance Analyzer, diseñado para medir un amplio intervalo de parámetros relacionados con la impedancia:

- $|Z|, |Y|, \varphi, R, X, C, L, G, B, D, Q$
- Intervalo de resistencias: 0.1 - 107 Ω .
- Intervalo de frecuencia de medida: 5 Hz - 13 MHz. Resolución: 1mHz.
- Nivel máx. tensión ac: 1.1Vrms. Resolución: 1mV. (5mV para niveles superiores a 100mV).
- Nivel tensión dc: ± 35 V. Resolución: 10mV.
- Velocidad de medida: Normal – Average – High Speed.

Un experimento clásico de perturbación consiste en aplicar un estímulo eléctrico (V ó I) y observar la repuesta del sistema (I ó V). Se asume que las propiedades del sistema electrodo-material son invariantes en el tiempo.

Al disponer del medidor comercial de impedancia en función de la frecuencia, se ha optado por medir la impedancia directamente en el dominio de la frecuencia aplicando para ello una tensión de frecuencia única a la pila de combustible y medir el modulo y la fase de la corriente resultante a dicha frecuencia.

▪ Protocolo de medida.

Para la medida de impedancia en función de la frecuencia, $Z(\omega)$, en la pila PEM, se dispone de una aplicación software “*HPTrack*” [HP 4192], previamente desarrollado en el Centro de Automática y Robótica del CSIC-UPM. Esta aplicación genera un archivo de datos en formato [frecuencia, parte real (Z'), parte imaginaria ($-Z''$)], y una representación grafica de los datos mediante el diagrama de Bode [Modulo, Fase]. Además, la ventana principal de la aplicación permite configurar diversos parámetros, así, para la caracterización de la pila se tiene:

* Magnitud medida:

De todas las immitancias disponibles se opta por medir: [frecuencia, $|Z|$, fase], ya que a partir de ellas se pueden obtener otras mediante la aplicación software.

* Intervalo de frecuencia:

Por razones experimentales se impone una frecuencia mínima de 100 Hz. Valores inferiores de frecuencia producen una medida incorrecta y un estancamiento en el barrido de frecuencia. La frecuencia máxima se limitó a 1 MHz.

* Barrido en frecuencia:

Se optó por el barrido descendente, motivado por problemas en la polarización de la membrana debido al depósito de iones en los electrodos.

* Velocidad de medida:

Se ha utilizado velocidad de barrido “average” para obtener medidas de mayor resolución. No interesa una velocidad de medida “high” ya que el sistema debe llegar al régimen permanente después de cada medida, eliminando el efecto del transitorio tras el estímulo, a las siguientes medidas.

* Tensión de alimentación:

Se realizaron pruebas experimentales con diferentes niveles en la tensión del estímulo para una temperatura de 23°C, Figura 3.6.

Una manera de ver la existencia de efectos no lineales por un estímulo es mediante la observación de la señal de salida, la no linealidad provocará la existencia de armónicos en la salida.

Como puede observarse en las gráficas de la derecha de la Figura 3.6, para una tensión de 50 mV empiezan a aparecer oscilaciones en la respuesta del sistema, además una parte importante de los datos resultan inaceptables; por ello se desestima esta tensión de oscilación, seleccionando la tensión de 100 mV como límite inferior para la señal de excitación en esta pila PEM.

La parte negativa del espectro de la figura 3.6, es decir, la inductancia, corresponde a las placas colectoras de la pila ya que generan una señal muy clara que se identifica como un comportamiento generalmente asociado a un metal. La existencia de una no linealidad en la respuesta de impedancia debido a la señal de estímulo será estudiada en la sección 3.3.

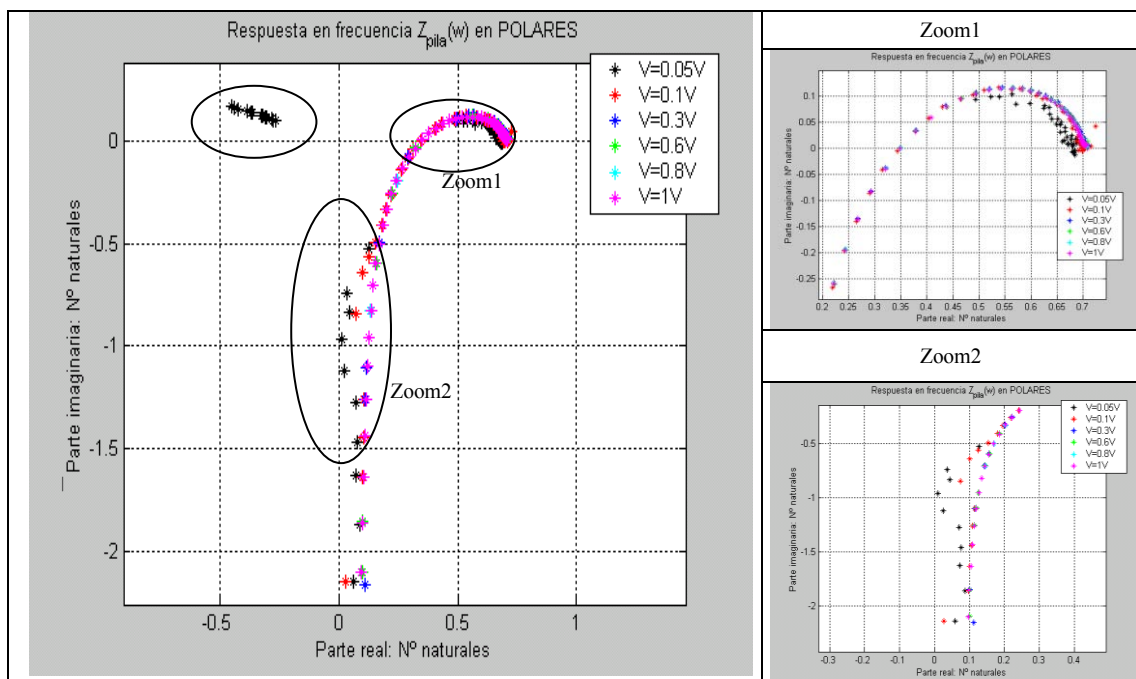


Figura 3.6 Respuestas en frecuencia de impedancia obtenidas a distintos niveles de voltaje.

3.2.2. Ajuste de los datos a un circuito equivalente.

El proceso de ajuste de los datos experimentales de impedancia en función de la frecuencia a un circuito equivalente es el que sigue:

- *Obtención experimental de los datos de impedancia en función de la frecuencia, $Z(\omega)$, de la monocelda PEM.* Para adquirir los datos de impedancia desde el Analizador de Impedancia comercial HP 4192 y generar el archivo de datos en formato [frecuencia, parte real (Z'), parte imaginaria ($-Z''$)], se utiliza la aplicación *HPTrack*, [HP 4192].
- *Ajuste parcial de los datos experimentales $Z(\omega)$ mediante circuitos equivalentes relativamente empíricos cuyas predicciones de impedancia se denotan en $Z_{ec}(\omega)$.* Básicamente, consiste en un análisis por partes de los datos en formato [frecuencia, parte real (Z'), parte imaginaria ($-Z''$)] generados por *HPTrack* [HP 4192], en la que se decide la estructura del subcircuito mediante un CIRCULO (impedancia compuesta por una resistencia y una capacitancia en paralelo) o una LÍNEA (impedancia compuesta por una resistencia y un inductor en serie). El análisis por partes se realiza al ejecutar la aplicación software de análisis de immitancias en sistemas electroquímicos “*Equivalent Circuit versión 3.97*”, desarrollada por Bernard A. Boukamp [Boukamp, B. A., 1989].
- *Parámetros y Código de Descripción del Circuito, CDC.* Al finalizar cada ajuste, la aplicación *Equivalent Circuit versión 3.97* [Boukamp, B. A., 1989], presenta los valores de los parámetros y el CDC del circuito equivalente.
- *Ajuste global del circuito equivalente.* La identificación concluye cuando los subcircuitos abstraídos reproduzcan la totalidad de los datos experimentales del espectro de impedancia compleja de la pila. Estos subcircuitos forman el circuito global de la pila y son utilizados en el ajuste total.

Para la evaluación de la bondad del ajuste se han contemplado dos indicadores:

- 1) El índice χ^2 que proporciona una buena indicación de la calidad del ajuste, siendo bueno para valores de χ^2 de 10^{-4} o menores. χ^2 proporciona una medida del error cometido entre las medidas experimentales y los simulados con la aplicación *Equivalent Circuit versión 3.97*, Eq. 3.1.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n [(y_i - Z_i(\omega)) / \sigma_i]^2 \quad (3.1)$$

Donde σ_i es la desviación típica de las medidas.

- 2) Se considera aceptable un ajuste en el que el error relativo en la estimación de cada parámetro sea menor del 30%.

▪ Código de Descripción del Circuito (CDC).

El Código de Descripción de un Circuito (CDC) es la representación de un circuito eléctrico equivalente, mediante la combinación de los siguientes elementos:

- *Elemento simple*: es aquel cuya función de transferencia no puede separarse en más partes independientes. Por ejemplo una resistencia o una capacidad. Generalmente, un elemento simple puede relacionarse con un único proceso físico (macroscópico).
- *Elemento compuesto*: se define como una caja con dos terminales que internamente está compuesta por elementos simples y/o compuestos asociados en serie o paralelo, Figura 3.7.

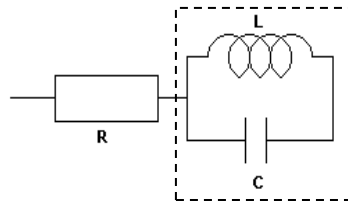


Figura 3.7 CDC correspondiente a un circuito R (LC paralelo).

3.2.3. Caracterización de la monocelda PEM.

Para comprobar el estado y el correcto funcionamiento de la pila PEM antes de su caracterización mediante Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC), se calcula la curva de polarización V-i, en “modo asimétrico” utilizando H₂ en el ánodo y O₂ en el cátodo, para la monocelda PEM, Figura 3.8.

Los valores de las variables de estado de la monocelda PEM en la que se obtuvo la curva V-i fueron:

- Caudal anódico Q_a y catódico Q_c: Q_a 0.15 L/min. y Q_c 0.25 L/min.
- Temperatura de la pila PEM: 60°C.
- Presión H₂ / O₂: 1 bar en ambos electrodos.
- Humedad H₂ / O₂: 100 %HR.

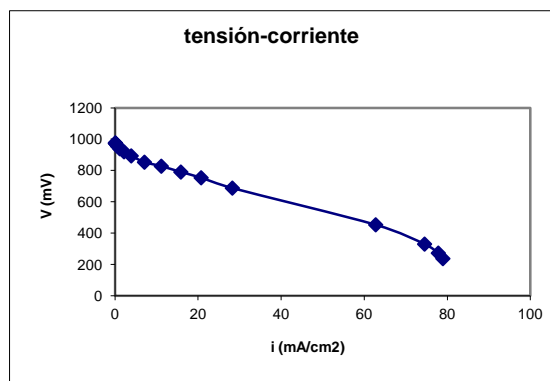


Figura 3.8. Curva de polarización tensión – corriente.

Los resultados indican que la monocelda PEM a esas condiciones de operación muestra un funcionamiento adecuado ateniéndose a los valores obtenidos de la densidad de corriente teniendo en cuenta la concentración de hidrógeno en la alimentación de 99.9%.

Verificado el funcionamiento adecuado de la pila PEM, se procede a su caracterización mediante la Espectroscopía de Impedancia Compleja, EIC. Para ello, se han realizado medidas con distintos valores de las siguientes variables de estado de la pila:

- Gases inyectados en ánodo /cátodo: Q_a 0.15 L/min. / Q_c 0.25 L/min. para Aire/Aire, N_2/N_2 , O_2/O_2 , H_2/H_2 .
- Temperatura de la pila, T^a : Ambiente, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C.
- Humectación de los gases inyectados: seco/humidificado para N_2/N_2 , H_2/H_2 .

▪ **Alimentación AIRE / AIRE.**

Los primeros espectros de impedancia compleja en función de la frecuencia de la pila PEM en funcionamiento en modo simétrico, Figura 3.9, se realizaron para distintos valores de la temperatura de la pila, con Aire/Aire y humectación 100%, con el objetivo de adiestrarse con el procedimiento y aplicación de la técnica de EIC. La Figura 3.9. muestra los valores experimentales de impedancia compleja de la pila Z_{pila} (modulo y fase) obtenidos desde el analizador de impedancia para dichas condiciones de funcionamiento de la pila PEM.

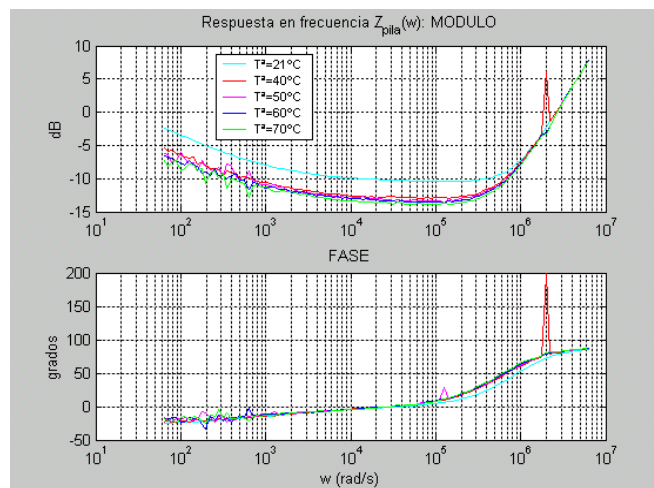


Figura 3.9. Respuesta en frecuencia de la Z_{pila} con alimentación: Aire/Aire.

Para realizar el ajuste parcial a un circuito equivalente de la respuesta en frecuencia de la pila PEM obtenida experimentalmente, se procede a representar mediante un grafico en POLARES (diagrama de Nyquist) los datos de la respuesta en frecuencia. Esta representación permite posteriormente comparar los resultados experimentales con los datos simulados generados al ejecutar la aplicación software *Equivalent Circuit versión 3.97*. [Boukamp, B. A., 1989].

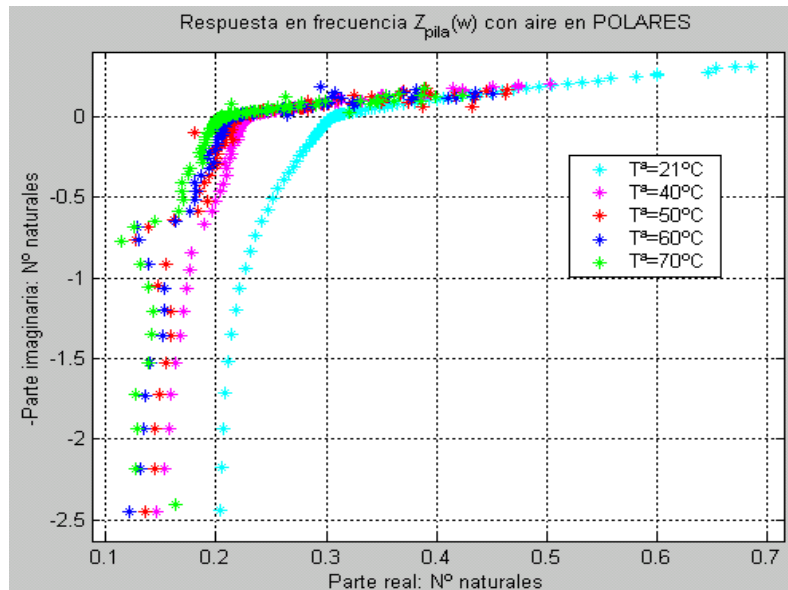


Figura 3.10. Representación de la Impedancia compleja (Aire/Aire).

La figura 3.10 muestra la representación típica en Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC) [parte real – parte imaginaria] de los datos experimentales de la respuesta en frecuencia de la pila PEM en las condiciones de operación de la pila definidas anteriormente.

Este procedimiento de caracterización y representación en polares [parte real – parte imaginaria], se realiza para todos los experimentos efectuados de EIC a la pila PEM con los distintos valores de las variables de estado de la pila, esto es: oxígeno/oxígeno en condiciones sin humidificar; nitrógeno/nitrógeno, en condiciones sin humidificar y humidificado; e, hidrógeno/hidrógeno sin humidificar y humidificado.

3.2.4. Modelado del circuito equivalente

A continuación, haciendo uso del programa *Equivalent Circuit versión 3.97* [Macdonald, J. R., 1987], se realiza el proceso de identificación de componentes de la pila y ajuste de la impedancia del circuito equivalente, partiendo con el espectro de impedancia obtenido experimentalmente mediante EIC para los distintos gases y variables de estado involucradas en cada experimento. Solo se analiza con detalle el primer caso, y para el resto solo se presentan los resultados obtenidos siguiendo el mismo procesamiento que en el primer caso.

▪ Identificación de componentes de la pila PEM con O₂/O₂.

A partir de los resultados experimentales obtenidos mediante Espectroscopía de Impedancia Compleja a unas condiciones de las variables de estado de $T^a = 50\text{ °C}$ y sin humectación, Figura 3.11.

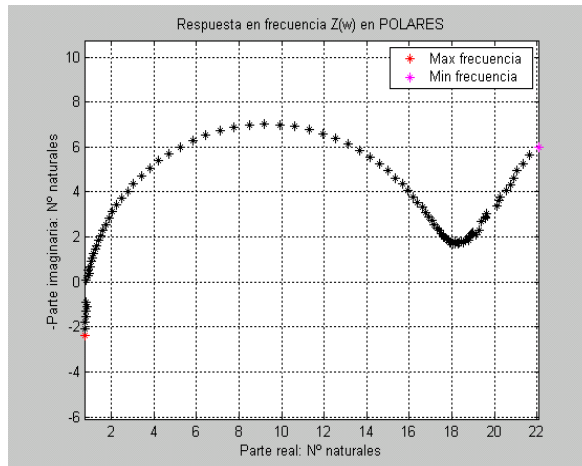


Figura 3.11. Representación de la Impedancia compleja (O_2/O_2).

Se analiza la respuesta en frecuencia en el plano de la impedancia $Z(w)$ obtenida con el Equivalent Circuit versión 3.97 [Boukamp, B. A., 1989], Figura 3.12.

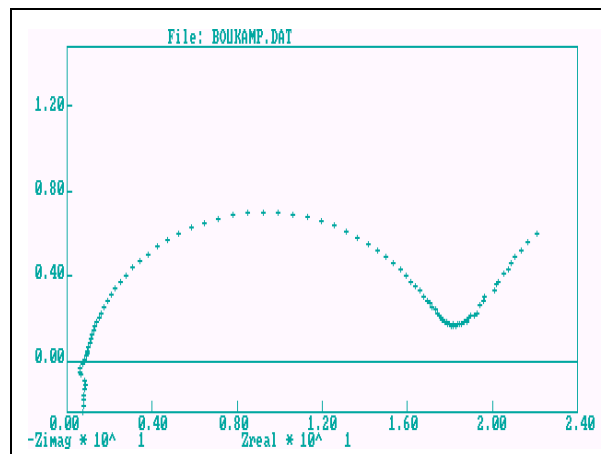


Figura 3.12. Respuesta en frecuencia de la impedancia $Z(w)$.

Se observa un efecto fuertemente inductivo en las altas frecuencias, mientras que a baja frecuencia la respuesta del primer cuadrante parece indicar una resistencia en paralelo con un elemento de impedancia distribuida, esto es, una resistencia, que es la causa del desplazamiento del semicírculo en el eje positivo de las abscisas, y otro semicírculo inacabado. Por lo tanto se opta por ajustar mediante una línea la parte de alta frecuencia y mediante dos círculos en la parte de bajas frecuencias.

Dada la verticalidad de los datos en su representación en polares a alta frecuencia, Figura 3.13, se decide un primer ajuste a una línea recta.

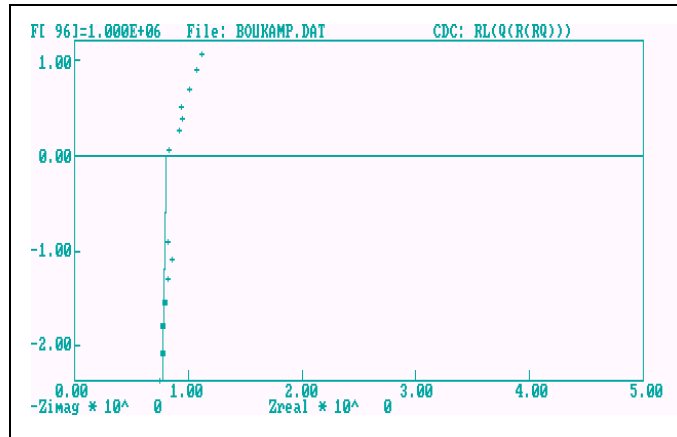


Figura 3.13. Ajuste por línea recta a los puntos de alta frecuencia

El subcircuito ajustado en este caso es una resistencia, R , en serie con una inductancia, L . Los valores de RL obtenidos en pantalla con el Código de Descripción del Circuito y el error de ajuste son mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valor de los parámetros RL serie tras el ajuste por una línea.

| Parámetros | Error relativo (%) |
|---------------------------------------|--------------------|
| $R = 0.8124 \Omega$ | 8.16 |
| $L = 3.3762 \cdot 10^{-7} \text{ H.}$ | 4.66 |

Se subtrae solo el valor de la inductancia L , dejando la resistencia en serie que existe como elemento aún por identificar. Los valores resultantes tras la substracción de L se muestran en la Figura 3.14.

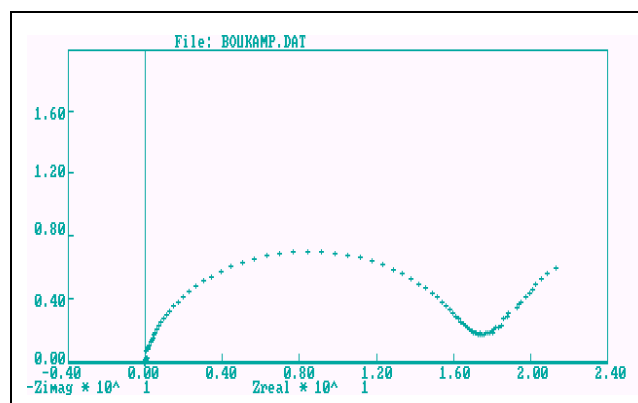


Figura 3.14. Resultados tras la substracción de la inductancia L .

En este caso no se observa un gran cambio en la representación de los datos, por lo que se continúa con la identificación propuesta para las bajas y medias frecuencias. Los datos se ajustan a dos circunferencias, seleccionando para ello puntos de muy baja frecuencia, ya que si se seleccionan los valores finales la identificación es mucho peor, produciéndose incluso valores de resistencia negativos. Figura 3.15.

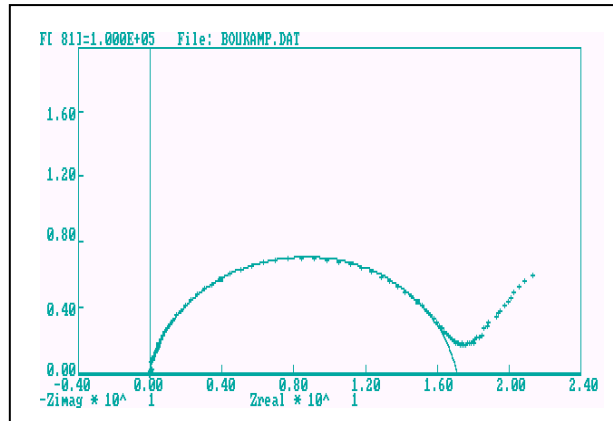


Figura 3.15. Ajuste mediante una circunferencia

El Subcircuito ajustado está compuesto por una resistencia R_2 y una capacitancia Q , con los siguientes valores:

$$R_2 = 17.1725 \Omega$$

$$Q: Y_0 = 4.4449 \cdot 10^{-8} \text{ F.}$$

Se procede a substraer los datos de la contribución del subcircuito $R_1(R_2Q)$ ya que este subcircuito está en serie con la inductancia substraída anteriormente. Figura 3.16.

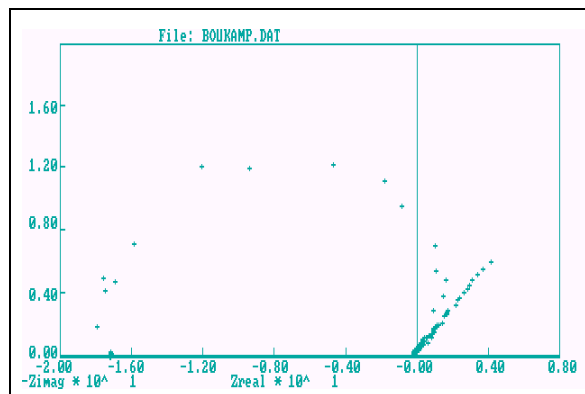


Figura 3.16. Datos resultantes tras la substracción del subcircuito (R_2Q).

Se puede observar como la mayoría de los datos restantes siguen un perfil de línea recta, y algún dato del círculo anterior. Por ello se procede a ajustar los datos restantes a una línea recta, Figura 3.17.

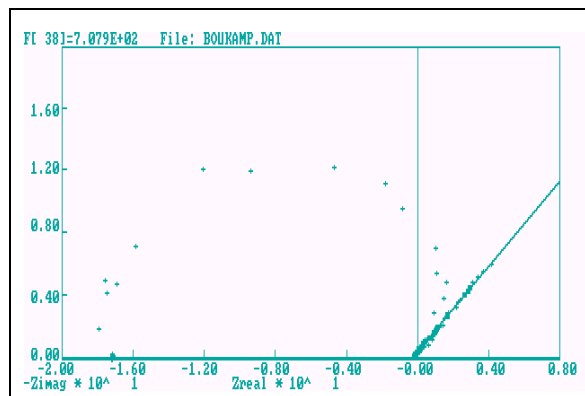


Figura 3.17. Ajuste a una línea recta

El Código de Descripción del Circuito obtenido tras el ajuste es un RQ, donde el valor de la pseudocapacitancia es, $Q = 2.8859 \cdot 10^{-7}$ F

Se procede a abstraer los datos de la contribución del subcircuito (RQ), observándose como resultado de la substracción que la mayoría de valores están en torno a cero, Figura 3.18.

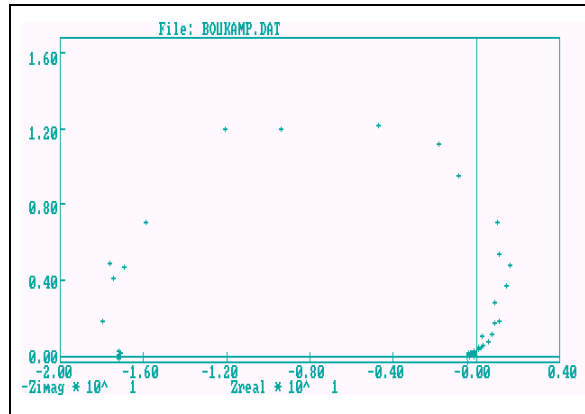


Figura 3.18. Datos remanentes tras la substracción del subcircuito (RQ).

Valores de resistencia negativa se desestiman, por lo que los datos restantes no generan ningún parámetro, en consecuencia todos los subcircuitos han sido identificados. Por lo tanto, se procede a un ajuste total de los datos al circuito resultante de la unión de los subcircuitos abstraídos. La Tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos en el Código de Descripción del Circuito: $LR_1(Q_1(R_2Q_2))$.

Tabla 3.3 Valor de los parámetros del circuito equivalente y error relativo.

| Parámetros | Error relativo (%) |
|------------------------------------|--------------------|
| $L = 4.1857 \cdot 10^{-7}$ H. | 1 |
| $R_1 = 0.7237 \Omega$ | 0.59 |
| Q: $Y_0 = 0.40238 \cdot 10^{-6}$ F | 3.2 |
| $n = 0.8863$ | 0.3 |
| $R_2 = 16.8733 \Omega$ | 0.5 |
| Q: $Y_0 = 1.22635 \cdot 10^{-2}$ F | 6.43 |
| $n = 0.5787$ | 2.49 |

El bajo valor final de $X^2 = 2.571 \cdot 10^{-4}$ confirma la correcta identificación del circuito equivalente de la pila en las condiciones propuestas. En la Figura 3.19, se muestran las respuestas en frecuencia $Z(w)$ medidas experimentalmente y las obtenidas del circuito equivalente identificado.

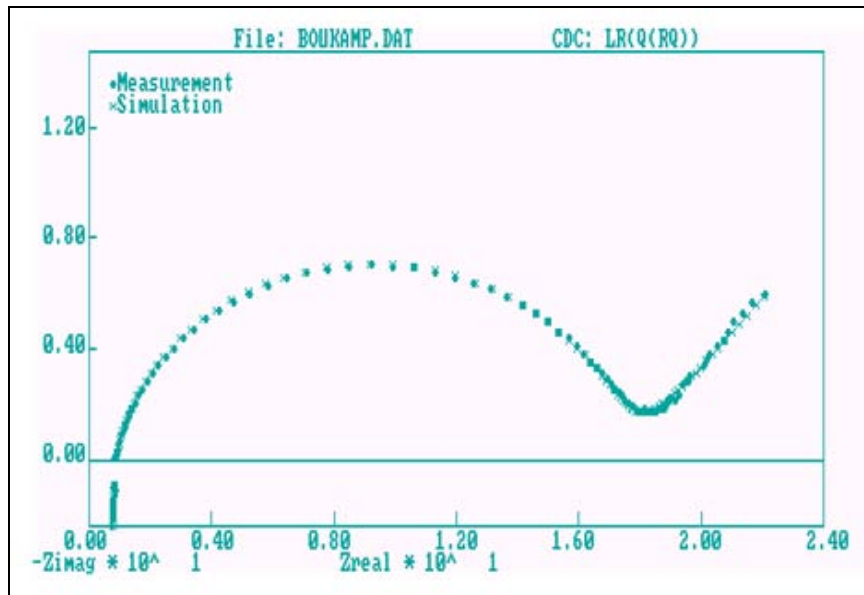


Figura 3.19. Comparación de la respuesta en frecuencia medida experimentalmente y de correspondiente al modelo de circuito equivalente identificado.

El error entre la respuesta en frecuencia medida y la respuesta del circuito equivalente identificado, en función de la frecuencia se muestra en la Figura 3.20.

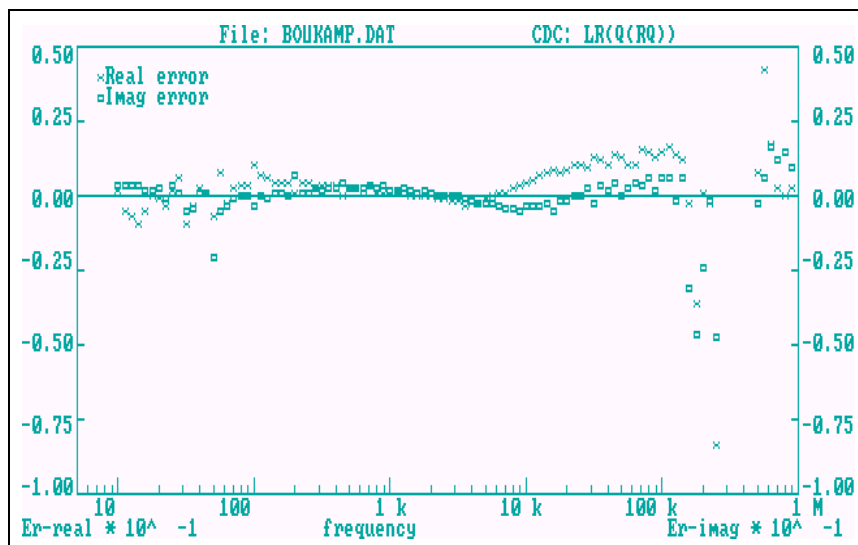


Figura 3.20. Error entre la respuesta en frecuencia medida e identificada.

Se comprueba la correcta identificación del circuito equivalente de la pila, ya que el error máximo es inferior a 0.02.

La Tabla 3.4 muestra el resumen de los valores de los parámetros de los circuitos equivalentes para los experimentos realizados con la pila PEM, obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en este apartado.

Tabla 3.4 Valores de los componentes de los circuitos equivalentes de la pila PEM.

| Pila | | | | | Q ₁ | | Z _d | Q ₂ | | | |
|---|------------------------|-----------------------|----------------------------|---|---|-------------------------|---|---|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | T ^a [°C] | R _m [Ω] | L [H] 10 ⁻⁰⁷ | R ₁ [Ω] 10 ⁻⁰² | Y ₀₁ (F ⁻¹) 10 ⁻⁰⁶ | n1 10 ⁻⁰¹ | R ₁ [Ω] 10 ⁻⁰¹ | Y ₀₂ (F ⁻¹) 10 ⁻⁰⁶ | n2 10 ⁻⁰¹ | X ² 10 ⁻⁰⁴ | Err max (%) 10 ⁺⁰¹ |
| Aire / Aire | 24 | 0.1922 | 3.92 | 9.54 | 7.98 | 9.86 | 1.86 | 1.56 | 5.54 | 1.58 | 4.61 |
| | 40 | 0.1406 | 3.92 | 7.256 | 4.75 | 1.00 | 1.18 | 2.27 | 5.51 | 5.68 | 1.11 |
| | 50 | 0.1033 | 3.97 | 1.088 | 6.79 | 9.47 | 2.61 | 9.87 | 6.47 | 6.09 | 1.01 |
| | 60 | 0.1011 | 3.96 | 10.11 | 3.11 | 1.00 | 2.42 | 9.00 | 6.55 | 2.46 | 1.80 |
| | 70 | 0.0826 | 3.98 | 10.33 | 3.15 | 1.00 | 9.64 | 3.83 | 5.82 | 3.66 | 1.94 |
| O ₂ / O ₂ | 50 | 0.7237 | 4.19 | 16.87 | 4.02 | 0.886 | | 1.23 | 5.79 | 2.57 | 6.43 |
| | 60 | 0.4718 | 4.25 | 10.196 | 4.61 | 0.885 | | 1.44 | 5.98 | 5.21 | 7.28 |
| | 70 | 0.3544 | 4.19 | 6.7419 | 4.98 | 0.885 | | 1.33 | 6.39 | 2.79 | 4.21 |
| N ₂ / N ₂ Seco | 40 | 0.1226 | 4.07 | 1.6903 | 3.84 | 0.992 | 1.46 | 1.97 | 5.56 | 1.01 | 2.03 |
| | 50 | 0.1650 | 4.00 | .01758 | 3.81 | 1 | | 3.71 | 4.58 | 2.01 | 9.50 |
| | 60 | 0.2610 | 4.14 | 1.4615 | 5.75 | 0.891 | | 4.62 | 6.07 | 2.61 | 8.64 |
| | 70 | 0.3278 | 4.15 | 3.7284 | 5.27 | 0.886 | | 4.85 | 5.76 | 1.39 | 4.08 |
| N ₂ / N ₂ Húmedo | 40 | 0.1888 | 4.96 | | | | | 9.65 | 3.42 | 3.65 | 2.57 |
| | 50 | 0.2006 | 4.82 | | | | | 9.19 | 3.40 | 3.78 | 2.62 |
| | 60 | 0.2730 | 4.78 | | | | | 5.98 | 3.74 | 7.72 | 3.83 |
| | 70 | 0.5010 | 4.24 | | | | | 2.38 | 4.16 | 1.04 | 1.29 |
| H ₂ / H ₂ Seco | 40 | 0.8928 | 3.61 | 17.946 | 3.96 | 0.873 | 5.94 | | | 2.14 | 2.84 |
| | 50 | 0.7792 | 3.61 | 9.7213 | 4.25 | 0.878 | 3.27 | | | 1.50 | 4.56 |
| | 60 | 0.6037 | 3.63 | 5.5599 | 4.67 | 0.883 | 1.58 | | | 2.16 | 3.22 |
| | 70 | 0.4861 | 3.65 | 3.3195 | 5.35 | 0.885 | 1.09 | | | 1.88 | 1.97 |
| H ₂ / H ₂ Húmedo | 40 | 0.1454 | 5.07 | 0.0363 | 1.53 | | | 2.12 | 6.06 | 3.37 | 5.22 |
| | 50 | 0.1385 | 4.96 | | | | | 3.58 | 3.42 | 2.19 | 9.00 |
| | 60 | 0.1070 | 5.30 | | | | | 2.07 | 5.84 | 1.79 | 7.80 |
| | 70 | 0.1881 | 4.96 | | | | | 1.04 | 7.36 | 4.54 | 1.36 |

3.2.5. Modelo eléctrico de una pila PEM

Como se puede comprobar con los valores de la Tabla 3.5. El Código de Descripción del Circuito para cada uno de los experimentos realizados con la pila PEM, presenta una estructura: R_m L (Q (R (Q R))), la representación gráfica de este circuito eléctrico equivalente genérico de una pila PEM se muestra en la Figura 3.21. En general, con las características de fabricación de la pila PEM descritas en el apartado 3.1 de este capítulo, la pila presenta un Código de Descripción del Circuito compuesto por:

$$R_m L (Q_1 (R_1 (Q_2 R_2)))$$

Siendo:

R, resistencia eléctrica.

L, inductancia.

Q, pseudocapacidad: elemento de impedancia distribuida.

Z_d, impedancia difusora: formada por un circuito (RQ) ó solamente Q, en función del gas utilizado.

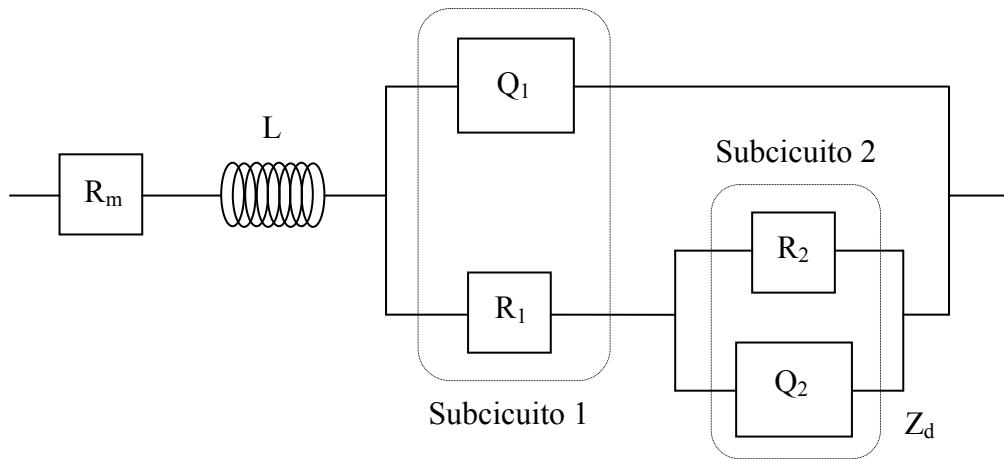


Figura 3.21 Circuito eléctrico equivalente de una pila PEM.

▪ **Significado físico del modelo.**

Una vez obtenido el circuito equivalente genérico de una pila, se procede a dotar de contenido físico real a cada uno de sus componentes, en relación a una parte física o proceso físico de la pila PEM. Así, se considera que:

- **R_m**: es la resistencia eléctrica que se asocia a la membrana de intercambio protónico de Nafión, en cuyo comportamiento, los parámetros claves son: el gas inyectado y su grado de humectación, la temperatura de la pila y en especial el contenido de agua en la pila.
- **L**: inductancia pura asociada con los efectos que provocan las placas colectoras, ya que generan una señal muy clara que se identifica como un comportamiento generalmente asociado a un metal.

Subcircuito 1.

Este circuito caracteriza el proceso de transferencia de carga que ocurre en los interfaces electrodo–membrana de la pila PEM. Los resultados muestran que para todos los gases a todas las temperaturas los valores R₁ son constantes y un valor tan alto de pseudocapacidad Q₁ (10⁻⁶), lo que indica que este subcircuito caracteriza un material mixto iónico-electrónico. Los típicos valores para materiales iónicos puros, como por ejemplo la membrana, son del orden de 10⁻¹²[7], mientras que en un material electrónico puro, por ejemplo un metal, no presenta capacidad alguna. Por tanto este subcircuito es asociado a los interfaces formados por la capa catalítica, el papel de carbón y la membrana de Nafión.

- **Q₁**: pseudocapacidad asociada a la doble capa electroquímica de los interfaces electrodo–membrana.
- **R₁**: caracteriza la resistencia a la transferencia de carga de los interfaces.

La presencia en el circuito equivalente de pseudocapacidades en vez de capacidades puras se relaciona con la presencia de electrodos no homogéneos.

Subcircuito 2.

Se relaciona con los fenómenos de transporte de masa (difusión y adsorción).

- **R2:** puede considerarse asociada a la denominada resistencia de polarización de la zona de transporte de masa de la curva de polarización; y como se puede observar sólo aparece cuando el gas inyectado es hidrógeno, ya que en el caso del aire la identificación presenta errores inaceptables.
- **Q2:** pseudocapacidad relacionada con los fenómenos de adsorción y difusión.

▪ Valoración de la EIC en la caracterización de una pila PEM.

El análisis realizado, muestra el cálculo e interpretación de los distintos componentes del circuito equivalente de una pila de combustible PEM en modo simétrico, es decir, con el mismo gas inyectado en ambos electrodos. Los resultados muestran la gran potencialidad de la EIC en:

- La investigación de los procesos que ocurren en una pila PEM.
- Caracterización de la influencia de las condiciones de operación. Discernir entre los gases inyectados en la pila PEM aquellos que forman parte sustancial de su funcionamiento normal en la generación de energía eléctrica, es decir, oxígeno e hidrógeno.
- La conductividad o estimación del grado de humedad en la membrana MEA

Sin embargo, la EIC presenta en la actualidad algunos inconvenientes que hacen que su uso esté aún muy restringido: la necesidad de 1) equipos de elevado coste, 2) dificultad para trabajar en tiempo real, y 3) difícilmente aplicable en funcionamiento asimétrico de la pila PEM (oxígeno / hidrógeno). Por todo ello, esta técnica no se ha utilizado para el control autónomo de la operación de una pila PEM, objetivo de esta Tesis.

3.2.6. Variables de estado relevantes sobre R_m del circuito equivalente.

A continuación se muestran los datos de impedancia compleja con los distintos gases inyectados tanto humidificados como sin humidificar en ambos electrodos de la pila PEM para las distintas temperaturas de funcionamiento. Se analiza el efecto que estas variables de estado de la pila producen sobre la variable R_m (resistencia de la membrana) del circuito equivalente, ya que el comportamiento de la membrana está íntimamente relacionado con el contenido de agua en la misma.

▪ Variación del gas inyectado.

Los valores del espectro de impedancia compleja en polares, para distintos gases, sin humidificar, que son inyectados en ánodo/cátodo a una misma temperatura de funcionamiento de 70°C, se muestran en la Figura 3.22.

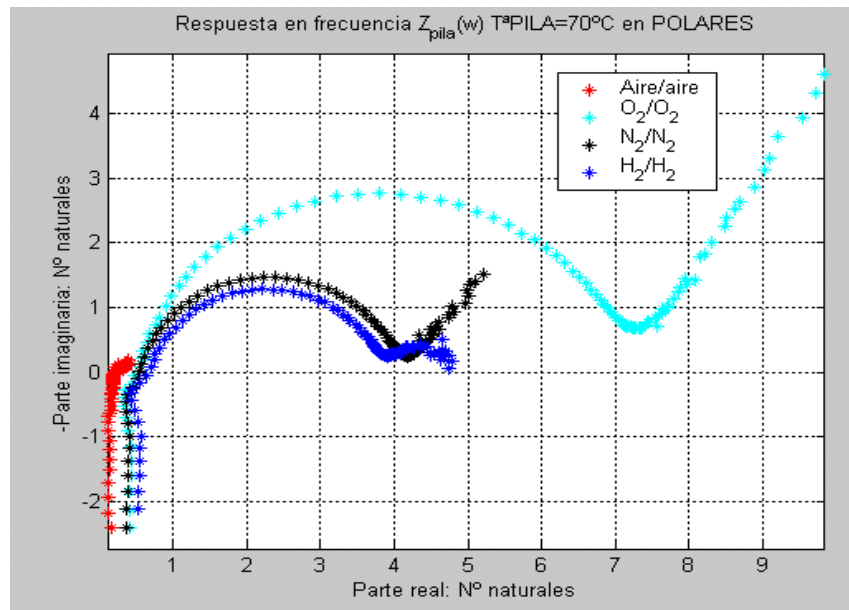


Figura 3.22 Respuesta en frecuencia para distintos gases a temperatura de 70°C.

Para analizar cómo afectan los distintos gases sin humidificar inyectados a la pila PEM, a la resistencia de membrana R_m del modelo del circuito equivalente, se procede a representar gráficamente los valores de R_m para los distintos gases inyectados a diferentes temperaturas Figura 3.23. Los resultados muestran como R_m varía sensiblemente cuando los gases inyectados son hidrógeno u oxígeno, con estos gases la pila se acopla adecuadamente, mientras que para el nitrógeno y aire no muestra ninguna variación.

En función del gas inyectado se obtienen valores muy diferentes, en el intervalo de bajas temperaturas de funcionamiento de la pila. Los valores más altos de R_m se obtienen con H_2 / H_2 , reduciéndose para O_2 / O_2 , N_2 / N_2 , y Aire /aire en este orden, como se observa en las gráficas de la Figura 3.23.

Estos resultados demuestran que mediante Espectroscopia de Impedancia Compleja (EIC) se puede determinar el tipo de gas que se inyecta en la pila, a través de los valores de la resistencia de membrana R_m .

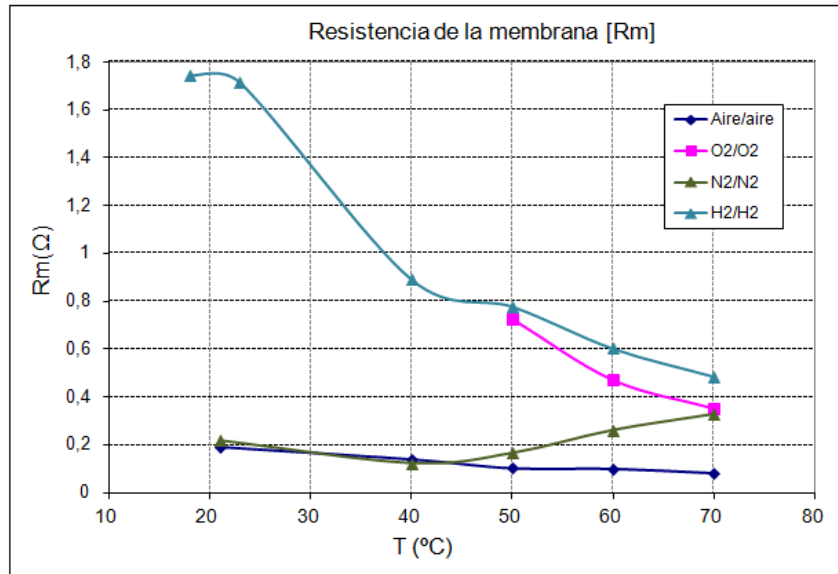


Figura 3.23 Variación de R_m en función del gas inyectado y temperatura de la pila PEM.

Representando gráficamente los valores de la inductancia L del *circuito equivalente* para los distintos gases inyectados sin humidificar y a diferentes temperaturas, Figura 3.24, se observa que el valor de la inductancia es muy parecido para todos los gases y por lo tanto este parámetro no se ve afectado por el tipo de gas inyectado. Este resultado se esperaba al no existir reacción del gas con las placas bipolares. Sin embargo, sí se aprecia una ligera variación cuando el gas esta humectado.

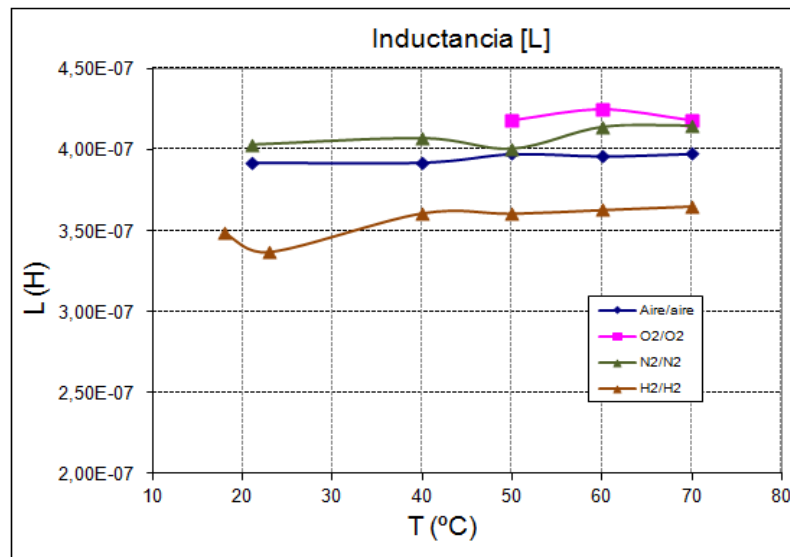


Figura 3.24 Variación de la inductancia L en función del gas inyectado a la pila PEM.

Se puede decir, que la EIC permite de forma inequívoca discernir entre los gases inyectados en la pila PEM, aquellos que forman parte sustancial del funcionamiento normal de generación eléctrica de la pila, es decir, el oxígeno y el hidrógeno, a partir del valor de R_m .

Cuando se inyecta nitrógeno el efecto del mismo no es significativo, y no se establece ninguna variación en la respuesta de los subcircuitos (modelos) propuestos, es decir en los parámetros (R_m , Q_1 , etc) del circuito equivalente.

▪ Variación de la Temperatura.

Los resultados obtenidos mediante técnicas de Espectroscopía de Impedancia Compleja, muestran cómo afecta la temperatura de funcionamiento de la pila a los valores de la variable R_m del modelo del circuito equivalente, en los casos de inyección de gases de H_2/H_2 y O_2/O_2 sin humidificar, Figura 3.23. Se observa una variación del parámetro reduciéndose el valor a medida que aumenta la temperatura de funcionamiento de la pila, mientras que para el caso de N_2/N_2 no presenta variación significativa. Este comportamiento es característico de conductores iónicos y de semiconductores. Esto indicaría que la variable resistencia de la membrana, R_m , está asociada a la membrana de intercambio protónico en cuyo comportamiento influye el contenido de agua de la misma, tal y como se comenta en el apartado 2.2.1 de esta memoria. Para unas mismas condiciones de gas inyectado el contenido de agua está muy relacionada con la temperatura de funcionamiento. A mayor temperatura de funcionamiento de la pila PEM, la membrana muestra una menor resistencia eléctrica.

Por lo tanto, todo coincide con la hipótesis de asociar esta variable del circuito equivalente de la pila con la resistencia de la membrana de Nafión. Este material, como buen conductor iónico (protónico) que es, muestra un comportamiento tipo Arrhenius ($\sigma_1 = \sigma_{01} e^{-\frac{E_a}{KT}}$) [7], es decir que a medida que aumenta la temperatura la conductividad protónica de la membrana de Nafión crece. Hay que tener en cuenta que un calentamiento excesivo puede hacer que R_m aumente con la temperatura.

Con respecto al valor de la autoinductancia L no se observa ninguna variación con la temperatura de la pila PEM, Figura 3.24.

▪ Variación de humidificación de los gases.

En la Figura 3.25 se representan los valores de resistencia de membrana, R_m de los resultados de la Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC) para los casos de inyección de gases, N_2/N_2 e H_2/H_2 , sin humidificar (seco) y humidificado (humec), saturado de agua, en ambos electrodos a distintas temperaturas de funcionamiento de la pila PEM, en el se estudia el efecto de la humidificación del gas en la variable R_m del circuito equivalente de la pila. No se realiza el estudio inyectando oxígeno humidificado en ambos electrodos porque interesa el comportamiento sin humidificar, ya que con la pila funcionando con carga el oxígeno humidificado en el cátodo satura de agua este electrodo.

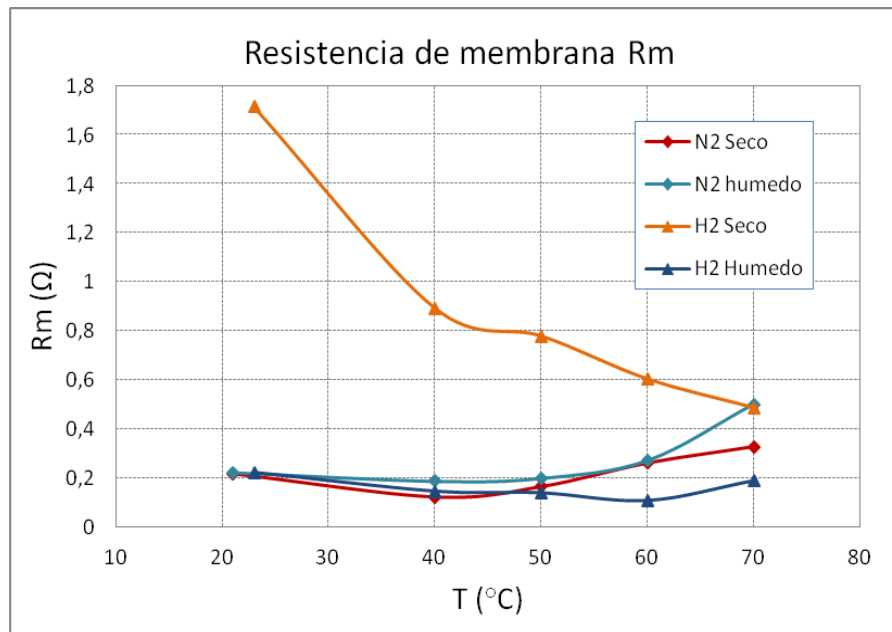


Figura 3.25 Valores de R_m para dos grados de humidificación del gas N_2/N_2 , H_2/H_2 en función de la temperatura.

En el caso de hidrógeno/hidrógeno seco se observan grandes diferencias en los valores de R_m , siendo, mucho menores para el caso de inyección de hidrógeno humidificado que para el hidrógeno sin humidificar. Por lo tanto en este caso con hidrógeno, la Espectroscopía de Impedancia Compleja permite conocer el grado de humidificación del gas inyectado a través del valor de la resistencia R_m y en consecuencia se podría fijar el nivel de humectación idóneo para el funcionamiento óptimo de la pila.

Cuando el gas inyectado se satura en agua, en el espectro de impedancia de hidrógeno/hidrógeno sólo aparece el efecto inductivo y el valor de R_m , pues los valores para los subcircuitos 1 y 2 en estas condiciones son poco relevantes, prácticamente cercanos a cero. Esto coincide con el hecho de que la membrana aumenta su conductividad cuando aumenta el contenido en agua en la misma, sin embargo, cuando el gas está humectado no se aprecia variaciones en el valor de R_m , lo que indica que la pila está encharcada y a medida que se aumenta la temperatura de la pila tiende a aumentar el valor de R_m , tal como se aprecia en la figura 3.25.

En el caso del nitrógeno/nitrógeno humidificado y sin humidificar se observa un valor de R_m pequeño similar al obtenido con hidrógeno/hidrógeno humidificado, los valores de R_m no se ven muy afectados por el grado de humidificación del gas esto probablemente se debe a que el nitrógeno es un gas que no reacciona con los electrodos en la producción de electricidad en la pila, por ello normalmente se lo utiliza como gas de limpieza en la pila.

- **Proceso de secado de PEM con N_2/N_2 .**

Tras la medida del espectro de impedancia compleja para el caso de inyección de nitrógeno humidificado se volvió a repetir la medición, pero en este caso con aire inyectado en ambos electrodos. En esta situación el espectro de impedancia obtenido muestra un cambio

significativo que consiste en la aparición de un circuito nuevo. Este circuito parece indicar que la membrana (MEA), tiene un elevado contenido en agua debido al valor de su R_m . Se continuó el proceso de secado inyectando nitrógeno en ambos electrodos, analizando el espectro de impedancia compleja a intervalos de tiempo de una hora. El orden descendente en la leyenda de la Figura 3.26 coincide con el orden cronológico durante el proceso de secado.

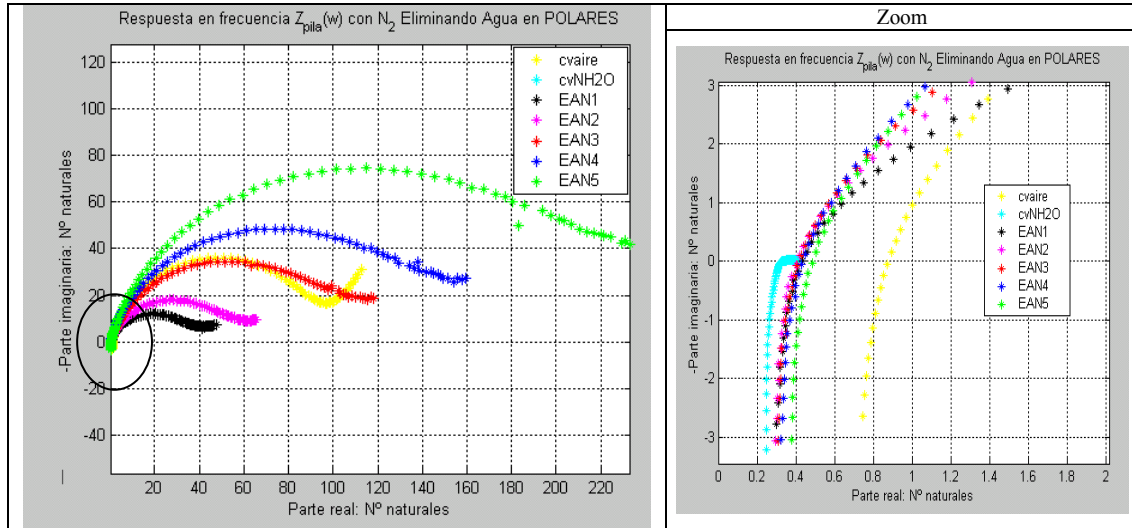


Figura 3.26 Respuesta en frecuencia de la pila durante el proceso de secado con N₂.

La curva de color amarillo (cvaire) corresponde al espectro con aire sin humidificar inyectado en ambos electrodos, tras ello la inyección de nitrógeno humidificado (cvNH₂O) que supuestamente provocó la alta concentración de agua (inundación) de la membrana. Se observa que esta respuesta es muy diferente respecto a las obtenidas previamente para el mismo caso, como puede comprobarse con el punto 3.2.3, Aire/Aire, Figura 3.10. Las siguientes gráficas (EAN, Eliminando Agua con Nitrógeno) corresponden a diferentes tiempos durante el proceso de secado. Se puede observar como los parámetros del espectro (R , Q) aumentan a medida que la pila PEM tiene menos contenido de agua. De nuevo la Espectroscopia de Impedancia Compleja constituye un excelente método de análisis para el conocimiento del grado de humidificación de la membrana.

3.3. Hacia el control autónomo multivariable de la pila PEM

Para mantener de manera autónoma unas prestaciones óptimas de la respuesta eléctrica generada por la pila PEM, es necesario disponer de un sistema de monitorización y control capaz de estimar las mejores condiciones de funcionalidad de la membrana en tiempo real y tomar las acciones necesarias para mantenerlas.

Se trata de una identificación y estimación del estado de la pila PEM de elevada complejidad, ya que el sistema a controlar es multivariable y no lineal:

* **Multivariable:** En el análisis de la respuesta eléctrica de la pila PEM en modo simétrico, mediante Espectroscopía de Impedancia Compleja, se ha mostrado la influencia de las siguientes variables:

- Condiciones ambientales: temperatura, humedad, presión...
- Condiciones estructurales internas: espesor de la membrana y de las placas bipolares.
- Condiciones estructurales externas: caídas de tensión en los electrodos, eliminación del agua generada, provocando que la distribución de potencial en la membrana varíe y por tanto varíe la eficiencia de la pila.

* **No lineal:** La pila de combustible PEM, se rige por la ley de Nernst Eq. (3.3) [7], y tiene un comportamiento no lineal.

$$E = E^0 - \frac{0.059}{z} \log Q \quad (3.3)$$

Así, para sistemas no lineales, como es la pila PEM, las medidas de Espectroscopia de Impedancia Compleja (EIC) tienen sentido sólo para magnitudes de la señal (estímulo), que produzcan una respuesta total del sistema electrodo-membrana eléctricamente lineal.

Como se comenta en [24], se recomiendan tensiones de estímulo muy pequeñas, menores de $V_T = 25mV$ a $25^\circ C$, para tensiones de excitación pequeñas se comprueban mediante las ecuaciones diferenciales básicas que gobiernan la respuesta del sistema, que ésta se puede considerar lineal, siendo aceptable como aproximación.

Sin embargo, el mínimo valor de tensión de estímulo con el que se han obtenido datos de interés en este análisis es de 100 mV , por lo que se conoce la existencia de una no linealidad en la respuesta de impedancia compleja, que se procede a analizar.

Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos, todo parece indicar que el valor 100 mV en lugar de 25 mV es consecuencia de la inductancia L tan alta que se observa en todos los puntos; lo que provoca que la señal de 25 mV no sea suficiente para establecer la mínima respuesta del sistema.

Si se analizan los datos de impedancia compleja para la inyección de nitrógeno seco en ambos electrodos a una temperatura de $70^\circ C$ y para distintas tensiones de estímulo, Figura 3.27., y a continuación el ajuste del circuito equivalente, se obtiene la variación de la resistencia R para las distintas tensiones de estímulo, Figura 3.28.

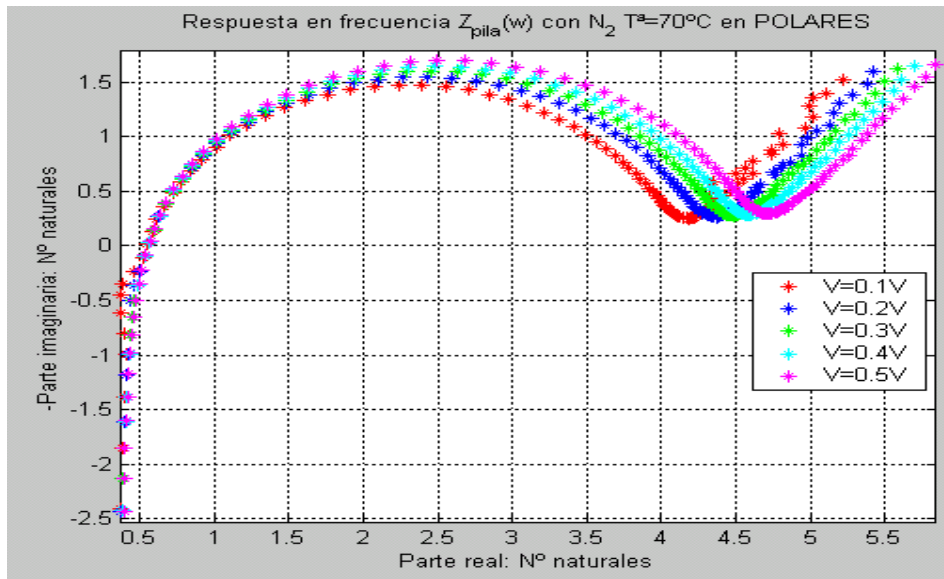


Figura 3.27 Respuesta en frecuencia para distintas tensiones de estímulo.

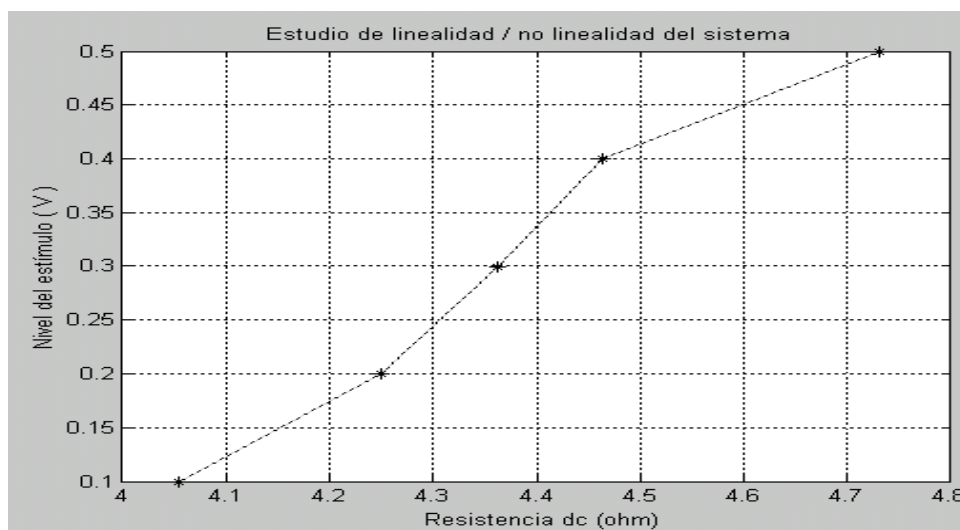


Figura 3.28 Valores de R para distintas tensiones de estímulo.

Se observa un comportamiento lineal con lo que se concluye que la tensión de estímulo de 100mV es válida, proporcionando una respuesta global del sistema eléctricamente lineal. En cualquier caso el valor de la resistencia varía muy poco por lo que el efecto del estímulo de 100 mV no es demasiado relevante.

Vistos estos resultados y los patrones de EIC obtenidos para la pila PEM, y teniendo presente el objetivo de su funcionamiento autónomo óptimo, se propone una identificación en tiempo real del estado de la pila PEM (punto de funcionamiento) a partir de la estimación del grado de agua contenido en la MEA. Se ha considerado la lógica borrosa (*fuzzy logic*) como una buena solución para el modelado del conocimiento experto de este tipo de sistemas, no sólo por ser adecuado para modelar la no linealidad inherente al sistema, sino por la facilidad de traducción en términos de control, de objetivos fácilmente descriptibles lingüísticamente.

Para ello, se parte del desarrollo de un sistema de medida y control flexible que permita:

- 1) Integrar en un mismo sistema, todas las prestaciones de monitorización, control de las variables de estado de la pila PEM, para abarcar en un intervalo amplio de potencia desde monoceldas hasta pequeños stack. y estimación.
- 2) Realizar la estimación de las condiciones óptimas de funcionamiento de la membrana (grado de agua) y control de estado de la pila PEM en modo autónomo para alargar su vida útil.

Para cumplir el primero de estos objetivos, en el Capítulo 4, se propone el desarrollo e implementación de un sistema de control integral de las variables de estado de la pila PEM.

CAPÍTULO 4

Control de las variables de estado de la pila PEM

En las pilas PEM de cátodo abierto a la atmósfera, el flujo de aire debe regular simultáneamente tres variables críticas, caudal del oxidante, evacuación del agua generada y temperatura de la pila, para el correcto funcionamiento de la misma. Este proceso, implica un compromiso entre caudales y humedades de los gases de entrada de forma que el caudal de oxígeno alcance los puntos de catálisis del cátodo sin llegar a dañar las condiciones hídricas de operación de la membrana y refrigerando suficientemente la pila de combustible, para que la temperatura de operación se establezca a un valor adecuado. En estas condiciones la solicitud de una demanda variable, muchas veces imprevisible como puede ser la potencia exigida para un vehículo constituye un problema que no siempre tiene respuesta aunque la pila ofrezca la potencia nominal necesaria. Esto, unido a la falta de homogeneidad en la puesta a punto de un nuevo modelo de pila de combustible que se realiza con una metodología artesanal, desde la selección de los materiales hasta su conformación a las condiciones de operación. A este grupo pertenecen una buena parte de las pilas de combustible PEM accesibles hoy en día en el mercado y que se utilizan como sistemas de demostración (por ejemplo, en centros escolares o laboratorios experimentales).

Para investigar y ofrecer soluciones a este tipo de situaciones es preciso disponer de sistemas de medida y control integrales para la vigilancia y regulación de las variables de estado más significativas de los procesos electro-químicos y fluido-dinámicos presentes en la pila PEM.

De hecho, en los últimos años se han desarrollado y comercializado distintos modelos de sistemas de monitorización y ensayo de pilas de combustible poliméricas, denominados estaciones o bancos experimentales de ensayos. Estos sistemas son capaces de medir y controlar las variables más significativas que afectan de manera directa al rendimiento de la pila PEM. Un ejemplo son los sistemas desarrollados por Hydrogenics [Hydrogenics, 2011], las de Electrochem [Electrochem, 2010], y los citados en algunos trabajos [Lee W. K., 1999][Wang J. T., 1996]. Estos sistemas instrumentales presentan la ventaja de estar operativas desde el momento de su adquisición, pero con los inconvenientes de que su operación suele estar limitada a un número reducido de opciones.

Otra opción, postula la utilización de controladores independientes para cada variable [Wookum L., 1999] o para una parte de las variables, mientras el resto están controladas por una estación de ensayos [Adjemian K. T., 2002]. El uso, parcial o total, de estos controladores presenta el inconveniente de la falta de integración, lo que dificulta tomar decisiones y acciones coordinadas, como por ejemplo, actuar sobre una variable en función del valor que toma otra. Estas actuaciones coordinadas, aunque no son necesarias durante el proceso de caracterización y ensayos de materiales y diseño de la pila bajo condiciones prefijadas, sí son muy útiles para conseguir un funcionamiento autónomo en condiciones óptimas de humectación de la pila de combustible en diferentes aplicaciones.

El análisis de las prestaciones de estos sistemas de medida y control en pilas PEM manifiesta que existen serias limitaciones. El obstáculo principal para su adquisición y uso se debe a la dificultad de integrar su funcionamiento con la información procedente de otros equipos o técnicas de medida, caracterización y regulación de las variables de operación de la pila PEM. De hecho, el desarrollo de un sistema de control que garantice la predicción del comportamiento óptimo de la pila de combustible desde la perspectiva de seguridad, eficiencia energética y autonomía de funcionamiento, a partir de plataformas comerciales convencionales, requiere una larga etapa de diseño e integración de los sistemas de actuación, percepción, procesado y comunicación. El volumen de información que hay que interpretar en tiempo real para ejecutar la actuación adecuada es el cuello de botella de estos sistemas.

Con el objetivo de desarrollar e implementar una arquitectura de organización del conocimiento y control para sistemas complejos en tiempo real, de aplicación en el control autónomo óptimo de una pila de combustible PEM, se ha procedido al diseño y desarrollo, en el Laboratorio de Energías Renovables e Hidrógeno (LERH) del Centro de Automática y Robótica (CAR) del CSIC, de un sistema de *control integral* para la monitorización, caracterización y control que cubre el intervalo de potencias de 0 a 300 Watios. Se ha dotado al sistema de mayor flexibilidad de la que ofrecen los sistemas actuales, tanto en la operación manual de la pila PEM, como en su funcionamiento autónomo-óptimo, permitiendo buscar de forma automática aquellos estados (en relación al contenido de agua en la membrana polimérica) en los que la pila funcione adecuadamente con un uso eficiente de los gases, como en el ensayo con determinadas condiciones prefijadas.

La primera sección de este capítulo ofrece una descripción de las variables de estado implicadas en la respuesta eléctrica de la pila de combustible PEM durante su funcionamiento

y las pautas a seguir para determinar los valores de operación de dichas variables. El mantener las variables de estado dentro de unos parámetros de operación que garanticen el correcto funcionamiento de la pila de combustible implica en primer lugar la elección e instalación de un conjunto de actuadores. La selección del tipo de actuador a integrar va a depender fundamentalmente de los objetivos propuestos, el tipo de combustible utilizado y las condiciones del entorno de operación de la pila. De este proceso de selección, diseño e integración de los sistemas de actuación trata la sección 4.2 de este capítulo.

La siguiente consideración para incrementar la autonomía de funcionamiento de la pila de combustible es la dotación sensorial que permita conocer en tiempo real el valor de las variables de estado de la pila PEM, con el fin de cerrar los lazos de control en el modo de funcionamiento autónomo óptimo. La descripción de los sensores se encuentra en la sección 4.3. En la sección 4.4 se describen los controladores de variable única implementados para la regulación de las variables de estado. Se realiza una comparativa de un controlador clásico PID con el controlador borroso en la estabilización de presión en el cátodo de la pila PEM. El siguiente paso consiste en el diseño y desarrollo del sistema de proceso y almacenamiento de la información, así como de un sistema de comunicación con el operario, a través del interfaz hombre-máquina. En la sección 4.5 se describe el sistema de proceso y comunicación para el funcionamiento manual de la pila PEM. La última sección, 4.6, detalla el sistema de control integral de la pila PEM embebido en lo que se conoce como estación de ensayos, en el se describen dos versiones desarrolladas.

4.1. Variables de estado

En la operación de la pila de combustible PEM intervienen cuatro circuitos específicos, *dos fluidicos y dos eléctricos*. Así, en los circuitos de fluidos se encuentra: el *Circuito del Ánodo* que corresponde al combustible (hidrógeno o nitrógeno para limpieza/seguridad), que va desde el depósito de almacenamiento o suministro hasta la evacuación de los productos y descargas de la reacción electroquímica. Este circuito incluye la regulación de caudal, presión, humedad relativa y temperatura del combustible. Mientras que en el *Circuito del Cátodo* correspondiente al oxidante (oxígeno o aire), que fluye desde el depósito de almacenamiento o suministro hasta la evacuación de los productos y descargas de la reacción. Al igual que el circuito del ánodo, en su línea de alimentación incluye los sistemas de regulación de caudal, presión, humedad relativa y temperatura del oxidante.

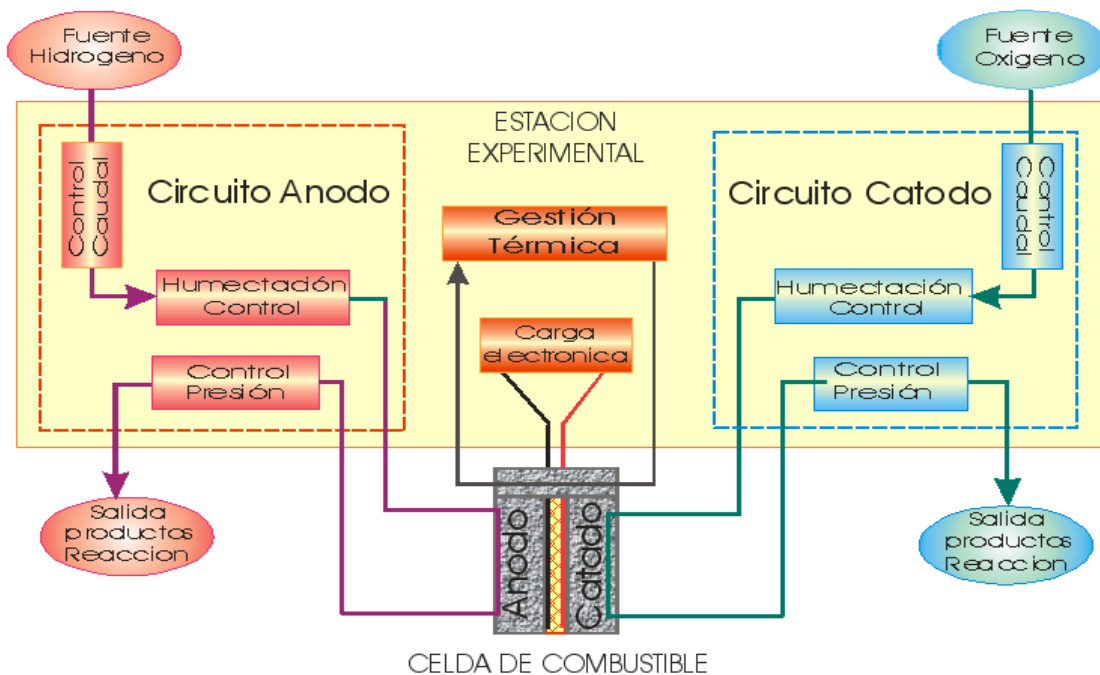


Figura 4.1. Variables de estado agrupados en los circuitos específicos de la pila.

Por otra parte, los circuitos eléctricos son:

- *Circuito de gestión térmica* que permite elevar la temperatura de la pila de combustible hasta su valor de operación. Está formado por un sistema de regulación de temperatura que varía en función de la potencia generada por la pila de combustible.
- *Circuito de la carga variable o carga eléctrica* compuesto generalmente por resistencias eléctricas de disipación de potencia. La función principal de este circuito es servir de sumidero de la potencia generada por la pila de combustible, facilitando la caracterización eléctrica de la pila. La Figura 4.1 muestra las variables de estado agrupadas en los circuitos específicos descritos.

En resumen, las variables de estado presentes en la operación básica de la pila de combustible PEM se pueden clasificar en dos grupos:

- a) Variables fluido-dinámicas correspondientes al suministro de gases, como son: caudal (Q); humedad relativa (HR); presión (P), y temperatura (T).
- b) Variables eléctricas que corresponden a la temperatura de la pila (T) y carga o resistencia eléctrica (R) aplicada a la pila para analizar su comportamiento eléctrico.

Tanto el suministro de los gases reactantes en ánodo y cátodo, como la temperatura de la pila de combustible, deben cumplir ciertas condiciones de operación antes de establecer contacto en sí a través de la membrana de la pila de combustible. Esto se debe principalmente, a que un determinado valor de una de estas variables de estado produce una determinada respuesta eléctrica de la pila, que generalmente no coincide con la deseada; de ahí la importancia de determinar los intervalos de valores de las variables de estado. De hecho, los requerimientos

máximos son determinados en función del área activa de la membrana de la pila de combustible, en otras palabras, de la potencia eléctrica máxima generada, Anexo I.1. Sin embargo, los valores mínimos dependen mucho de los intervalos de medida de los sensores y actuadores utilizados. La Tabla 4.1 describe los valores mínimos y máximos asignados a las distintas variables de estado.

Tabla 4.1. Intervalo de valores de las variables de estado a controlar.

| VARIABLE DE ESTADO | VALOR MÍNIMO | VALOR MÁXIMO |
|---|----------------|------------------|
| Caudal: H ₂ /N ₂ | 0.05 [L/min] | 5 [L/min] |
| Caudal: Aire/O ₂ | 0.10 [L/min] | 10 [ml/min] |
| Temperatura: H ₂ /O ₂ | ambiente | 120 [°C] |
| Presión: H ₂ /O ₂ | 0 [bar] | 5 [bar] |
| Humedad: H ₂ /O ₂ | 0 [%HR] | 100 [%HR] |
| Temperatura de la pila | Ambiente | 90 [°C] |
| Carga a aplicar | 0,0005 [ohmio] | Circuito abierto |
| Potencia a disipar | 0 | 1000 [W] |

4.2. Sistemas de actuación

Para obtener un buen comportamiento eléctrico de la pila de combustible, durante su funcionamiento autónomo es de vital importancia estabilizar tres parámetros:

- a) Presión anódica y catódica.- La pila de combustible se encuentra sometida a una presión interna a través de los caudales de los gases (presión del gas), el tener diferencias de presión altas entre ánodo y cátodo podría conducir a perforaciones en la membrana. Esta diferencia es un punto clave con pilas con canales de distribución de gases en placas corrugadas, ver sección 3.3.
- b) Humedad de la pila.- Un parámetro importante para evitar la deshidratación e inundación del ensamblado electrodos-membrana (MEA) de la pila PEM, es el balance de agua. Sin una adecuada humidificación de la membrana durante el funcionamiento de la pila de combustible, la conducción iónica se realiza con una baja eficiencia y en consecuencia con un bajo rendimiento eléctrico de la pila [James L. y Andrew D, 2000].

- c) Carga eléctrica.- La manera de caracterizar el comportamiento eléctrico de la pila PEM, tanto en su respuesta dinámica como estacionaria, es a través del análisis temporal de su respuesta eléctrica (curva V-i). Para ello, es necesario aplicar entre los bornes de sus dos electrodos una determinada carga. La incorporación en tiempo real al sistema de control integral de la carga eléctrica permite además de caracterizar la pila, estudiar su comportamiento ante aplicaciones concretas.

Para mantener estos parámetros operando dentro de unos límites prefijados es necesario el uso de sistemas de actuación. Los sistemas de actuación más difundidos en la tecnología de las pilas de combustible son fundamentalmente de dos tipos: eléctricos y neumáticos. El comportamiento de los actuadores es crítico en lo que se refiere a velocidad de respuesta y potencia consumida, pues condicionan el rendimiento y eficiencia de este generador eléctrico. Por ello, es conveniente analizar las características de los actuadores ante un determinado sistema y posibles aplicaciones. Entre las características más relevantes se encuentran: relación coste/potencia y peso/volumen, velocidad de respuesta, precisión, robustez, seguridad, posibilidad de control continuo y finalmente facilidad de mantenimiento.

Por todo ello, los sistemas eléctrico/electrónicos son los más utilizados dada su facilidad de control, alimentación, instalación y nivel de ruido en las tareas de regulación de presión, caudal y temperatura. Sin embargo, su principal inconveniente en el campo de las pilas de combustible radica en el coste y seguridad, debido a la incorporación de sistemas auxiliares, en especial en el control de presión, y a la necesidad de desclasificar el entorno de uso utilizando, por lo general tecnología ATEX, sistemas altamente compactos para operar en zonas explosivas, lo que triplica el precio de los dispositivos. En este caso por las características del sistema a controlar se utilizan actuadores eléctricos, esto es: relés de estado sólido y dispositivos semiconductores para la regulación de caudal másico, temperatura y variación de carga, respectivamente.

Sin embargo, para la regulación de humedad y en especial de la presión de los gases, los actuadores neumáticos son una buena alternativa ya que funcionan con aire a presión (5bar) y cualquier fuga no contamina el entorno, no son inflamables con el hidrógeno y su coste es asequible; ahora bien introducen un cierto grado de contaminación acústica. La existencia de aire comprimido en las instalaciones del LERH-CSIC facilita la integración en la línea de suministro de los gases reactantes, de válvulas de membrana de alta fiabilidad y robustez industrial, con actuación neumática mediante electroválvulas en una línea auxiliar de gas de control (aire comprimido), para la regulación de humedad y presión, Figura 4.2. Sin embargo, debido a la compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no consiguen una buena precisión en el ámbito de control, no obstante, su sencillez y robustez los hacen especialmente adecuados para este tipo de sistemas, donde únicamente se necesita posicionar dos estados: abierto o cerrado, como es el caso de la regulación de presión y humedad.

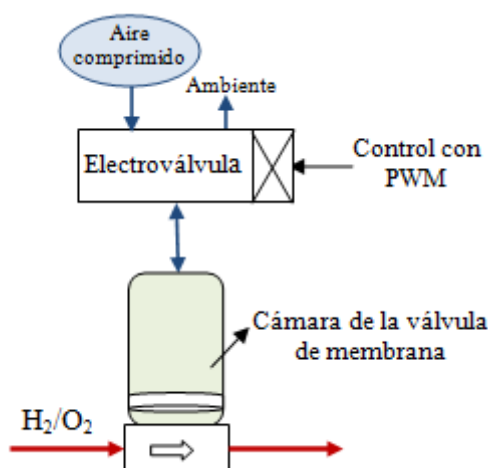


Figura 4.2. Esquema de integración de válvulas de membrana actuadas neumáticamente para la regulación de la presión y la humedad.

Los actuadores utilizados tanto eléctricos como neumáticos al ser dispositivos de funcionamiento “todo/nada”, no permiten un control proporcional directo de las variables a regular, esto es, una regulación continua; sólo sería posible una regulación en los extremos de su rango de operación, abierto/cerrado.

Sin embargo, para el buen funcionamiento y caracterización de una pila de combustible PEM se requiere una regulación continua de estas variables. Ahora bien, es posible conseguir una regulación semi-continua, mediante la apertura de estos actuadores en intervalos variables de tiempo, sin necesidad de disponer de un actuador proporcional, mediante una modulación en anchura de pulso PWM (Pulse Width Modulation). Para ello se aplica un voltaje constante al actuador durante intervalos de tiempo variables, a fin de controlar el periodo en el que el actuador está abierto, Figura 4.3. La variable PWM, Eq. (4.1) se mide en tanto por cien de la anchura del ciclo de duración total T_a .

$$PWM = T_b / T_a \times 100 \quad (4.1)$$

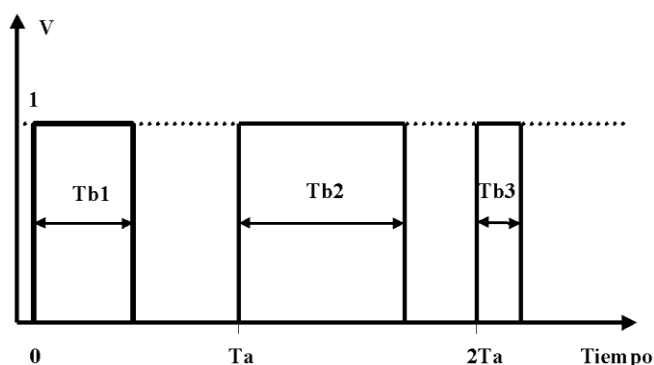


Figura 4.3 Modulación en anchura de pulso (PWM)

4.2.1. Estabilización de presión en cátodo

En las pilas PEM el suministro de los gases reactivos es un sistema abierto, que requiere una regulación de presión “back pressure” desde atrás. Estos sistemas de regulación de presión son idénticos tanto en ánodo como en cátodo. En los sistemas comerciales, la regulación de presión se realiza utilizando actuadores electrónicos, como: motores y reguladores electrónicos de presión. La incorporación de estos sistemas de regulación en la línea de suministro de los gases conlleva algunos inconvenientes, tales como:

- Condensación de agua en la pila y en el dispositivo de regulación debido a que incorporan válvulas de agujas para regular la presión, es decir, realizan una estrangulación del gas a la salida.
- Este tipo de regulación produce fluctuaciones en la presión y daños irreversibles en los controladores electrónicos, por lo que es necesario la utilización de sistemas de deshumidificación del gas. Algunos sistemas solucionan este problema incorporando en línea dispositivos semiconductores PELTIER [ICP, 2009].
- La implementación de estos sistemas de regulación electrónicos hace necesario la utilización de instrumentación y equipos adicionales para su control.

En esta sección se proponen sistemas novedosos para la regulación de presión de los gases anódico y catódico de la pila de combustible PEM, para solucionar los problemas presentes en la incorporación de actuadores electrónicos. La regulación de presión se realiza utilizando válvulas de membrana de alta fiabilidad y robustez industrial, con actuación neumática en modulación de ancho de pulso PWM. Las fluctuaciones de presión obtenidas en la línea de alimentación del gas característico de este tipo de control, se suavizan con la integración, en línea, de un depósito (buffer).

▪ **Regulación con modulación PWM en línea de suministro del gas.**

El sistema de regulación de presión mediante la modulación PWM en línea de suministro de gas catódico, se presenta en la Figura 4.4. Para incrementos de presión en la pila PEM, presión a controlar, P_c . El controlador cierra la válvula de membrana V_m ubicada a la salida de la línea de suministro de gas obstruyendo con ello el paso del flujo de gas, lo que produce un aumento de la presión en la pila. Por otra parte, un descenso en la referencia de la presión en la pila, provoca por parte del controlador una abertura de la válvula V_m permitiendo una disminución de presión en la pila. Un simple modelo eléctrico del suministro del flujo de gas en el cátodo de la pila de combustible permite un fácil diseño y optimización para cada aplicación en particular.

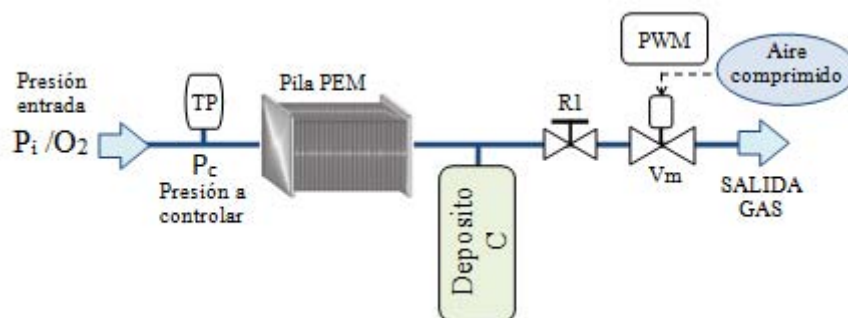


Figura 4.4 Sistema de regulación de presión mediante PWM en línea.

▪ **Modelo Eléctrico del sistema de regulación de presión (cátodo).**

Si se analiza el sistema a presión de la Figura 4.4, la corriente del flujo de gas a través de la restricción hidráulica de la tubería, es función de la diferencia de presión de entrada P_i y salida P_o del gas en la línea de suministro. Para encontrar la función de transferencia de este sistema, se debe analizar la posición de la válvula de membrana en sus dos estados de funcionamiento, esto es, abierta y cerrada. Se ha determinado un modelo eléctrico para cada estado de la válvula, aplicando los conceptos de capacitancia y resistancia en sistemas de gases a presión [Ogata K., 1998], Anexo I.2, Figura 4.5. La función de transferencia que define al sistema de regulación de presión en sus dos estados de operación de la válvula de membrana es representada por la Eq. (4.2).

$$P_c = \begin{cases} P_c(s) = \frac{P_i(s)}{RCs + 1} & \text{Válvula cerrada} \\ P_c(s) = \frac{P_i(s)}{RCs + \left(1 + \frac{R}{R1}\right)} & \text{Válvula abierta} \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde: (RC) tiene dimensión de tiempo y representa la constante de primer orden del sistema, es decir, el tiempo que tarda en estabilizarse la presión ante una variación en la entrada.

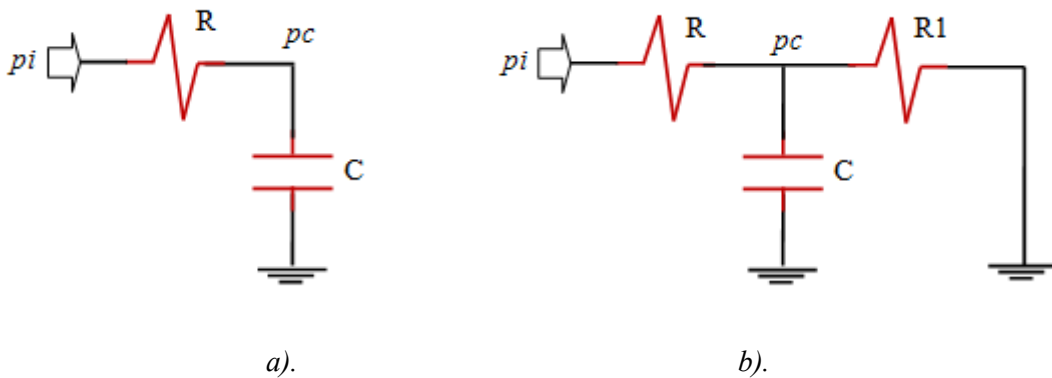


Figura.4.5. Modelo eléctrico de la regulación de presión. Estado de la válvula de membrana: a) cerrado; b) abierto.

El sistema de regulación de presión, mediante la modulación de ancho de pulso en la línea de suministro de gas propuesto, elimina los problemas de condensación en la pila y descarta el uso de dispositivos auxiliares de alto coste. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el tamaño del depósito se incrementa a medida que se trabaja con pilas de combustible de mayor potencia, debido al mayor suministro de caudal requerido. Una manera de resolver este problema es mediante la implementación de una regulación de presión continua en línea de suministro de gas.

- **Regulación de presión CONTINUA en línea.**

El objetivo de este nuevo sistema para la regulación de presión de los gases anódicos y catódicos de la pila de combustible, es reducir el tamaño del depósito en la línea principal de suministro de gas utilizado en el control PWM. Con ello se dota de mayor seguridad al sistema, en especial cuando se trabaja con pilas de potencias media-alta. La implementación de este sistema permite operar en un amplio intervalo de potencia de las pilas de combustible, tanto para su caracterización eléctrica como para aplicaciones demostrativas. Una característica innovadora de este método, es que el depósito utilizado para reducir las fluctuaciones del control PWM se traslada a un circuito auxiliar de control que no se encuentra en la línea principal de los gases reactantes, Figura 4.6.

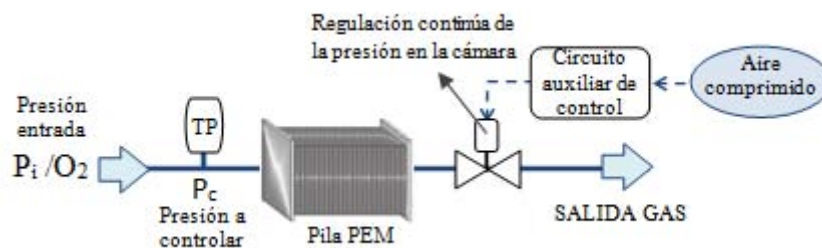


Figura 4.6. Sistema de regulación de presión eliminando el depósito en línea y trasladándolo al sistema auxiliar de control.

El sistema propuesto permite regular el paso del flujo de gas reactante de manera continua, esto es posible mediante la regulación de presión de control auxiliar (Pc^a) dentro de la cámara de la válvula de membrana ubicada en la línea principal de suministro de gas. En el sistema auxiliar de control se emplea aire comprimido con un caudal sumamente pequeño comparado con el caudal de los gases utilizado en la reacción electroquímica de la pila PEM.

La ecuación diferencial del caudal en la línea principal de suministro de gas reactante, Eq. (4.3), puede determinarse aplicando los conceptos de gases a presión [Ogata K., 1998]. La resistencia al flujo de gas es función de la relación entre la caída de presión en la válvula de membrana y el flujo de gas que la atraviesa. A medida que la válvula de membrana se cierra, la resistencia al paso de caudal aumenta, lo que genera una reducción de caudal a la salida de la válvula, esta reducción de caudal causa un aumento de presión a la entrada de la pila, en sentido contrario el caudal aumenta y con ello la presión a la entrada de la pila disminuye.

$$Q = \frac{\Delta P}{Rv} \tag{4.3}$$

El análisis del comportamiento dinámico de la presión de control auxiliar Pc^a en la cámara de la válvula de membrana se realiza mediante un modelo eléctrico.

- **Modelado Eléctrico de la presión Pc^a .**

Para regular la presión de control auxiliar Pc^a se hace uso de un circuito auxiliar, Figura 4.7a. El principio de funcionamiento es similar al utilizado en la regulación de presión con modulación en línea, con la diferencia de que la modulación se aplica a una electroválvula que controla el suministro de aire comprimido hacia el interior de la cámara de la válvula de membrana. Al utilizar un flujo pequeño de gas en el circuito auxiliar de control, el tamaño del depósito para eliminar el rizado característico de la modulación de ancho de pulso se reduce.

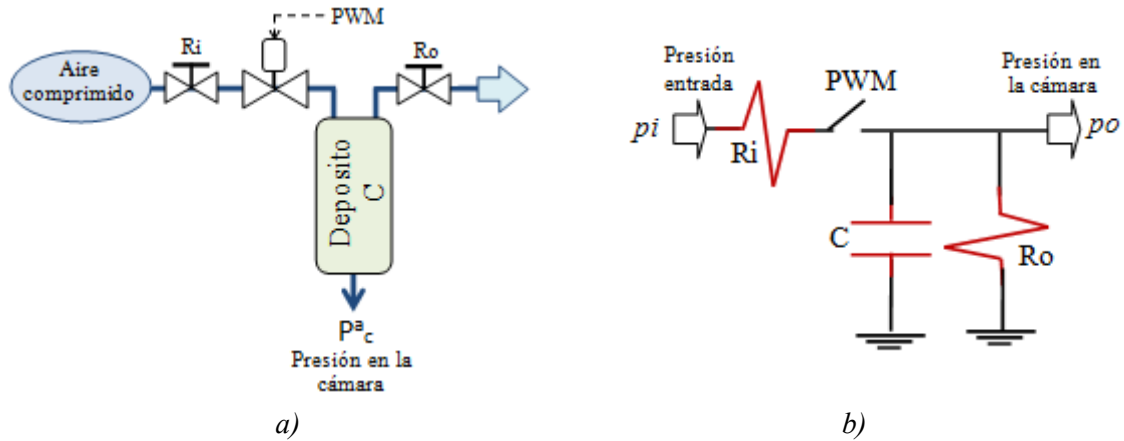


Figura 4.7. Sistema de regulación de la presión de control auxiliar. a) Sistema físico. b) Modelo eléctrico.

La función de transferencia que define a este sistema se formula mediante la Eq. (4.4) y se determina analizando la posición de la electroválvula en sus dos estados de funcionamiento, abierta y cerrada.

$$\frac{Pc^a(s)}{Pi^a(s)} = \frac{1}{\left(\frac{Ri}{Ro} + 1\right) + RiCas} \quad [4.4]$$

Donde: $(Ri Cas)$ tiene la dimensión de tiempo y es la constante de primer orden del sistema, es decir, el tiempo que tarda en estabilizarse la presión Pc^a ante una variación en la entrada. El modelo eléctrico equivalente al sistema de regulación de la presión de control auxiliar, se muestra en la Figura 4.7b.

4.2.2. Estabilización de la humedad en la pila

El balance de agua de la pila de combustible es uno de los obstáculos más difíciles a superar de los sistemas de medida y control, en especial cuando se trata de controlarlo en tiempo real. La adición de una cantidad reducida de agua en la corriente de gas puede secar la membrana y causar daños irreversibles [Natarajan D., 2005]. Por otra parte, una cantidad alta de agua en la corriente de gas puede llegar a inundar la membrana y los electrodos, lo cual impide el transporte de gas en las áreas de reacción electroquímica, y limita el rendimiento de la pila de

combustible [Djilali N., 2002]. Este parámetro se controla mediante la regulación del caudal, humedad, temperatura del gas y temperatura de la pila de combustible.

- **Regulación de caudales.**

El caudal de suministro a la pila es una de las variables que más afecta a su funcionamiento, de hecho, el efecto de la falta de uno ellos en la respuesta eléctrica de la pila PEM se presenta en el trabajo realizado por Natarajan [Natarajan D., 2005]. Hay que tener cuidado de no fijar unos caudales muy altos pues se podría llegar a perforar la membrana, al generarse grandes diferencias de presión entre la entrada de oxígeno y la salida de hidrógeno al encontrarse enfrentados. La regulación de esta variable se ha realizado empleando medidores-controladores de flujo másico por efecto térmico. Estos dispositivos proporcionan un flujo de gas programable y son muy precisos, pero encarecen notoriamente el coste total del sistema de medida y control.

- **Regulación de humedad y temperatura de los gases.**

La humidificación de los gases constituye una forma de controlar el balance de agua en la pila de combustible. El método implementado en este trabajo para la regulación de la humedad relativa del gas se corresponde al método de burbujeo, que consiste en hacer pasar el gas a través de un depósito (humectador) con agua desionizada. Una característica innovadora incorporada a este método y que ha sido patentado, es la implementación de un serpentín de tubo de acero inoxidable en el interior del humectador que actúa como un intercambiador de calor, permitiendo calentar el gas sin llegarlo a humidificarlo. Esto permite experimentar con ciertas condiciones en las que no se necesite que el gas este humidificado, pero si con un valor determinado de temperatura, como por ejemplo, en condiciones en que la pila tenga demasiada agua en su interior, es necesario suministrar el gas seco y a una temperatura tal que permita evacuar el agua.

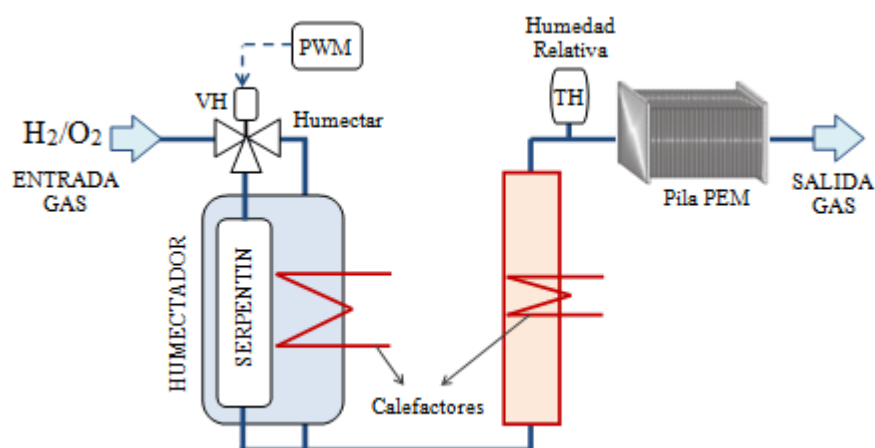


Figura 4.8 Sistema de control de humedad de los gases por burbujeo.

El control de la humedad tanto en el lado anódico como catódico de la pila de combustible, se realiza en función del tiempo de proceso de humectación del gas. Esto es, mediante la selección de humectación o no humectación, a través de la válvula VH con actuación neumática mediante una electroválvula, Figura 4.8. El aire a presión entrante al actuador neumático presiona el vástago y lo desplaza produciendo un cambio en la dirección del gas de reacción, dependiendo del estado de excitación de la bobina de la electroválvula se obtienen los dos modos de funcionamiento del sistema de regulación de humedad. Se puede conseguir una regulación continua de la humedad mediante la conmutación de la válvula neumática en intervalos variables de tiempo, sin la necesidad de disponer de una válvula proporcional. De ahí que la regulación de humedad se lleve a cabo mediante la modulación en anchura de pulso, PWM.

Para el calentamiento de los gases reactantes que son inyectados a la pila de combustible desde sus respectivos depósitos de almacenamiento se realiza de manera indirecta mediante la incorporación de resistencias calefactores que van colocadas en el interior del humectador, cuyo encendido y apagado se realiza mediante modulación en anchura de pulsos, PWM, lo que permite regular la temperatura del agua des-ionizada dentro del humectador y con ello la temperatura del gas que lo atraviesa. Para mantener la temperatura del gas humectado hasta su contacto con la pila, se ha incorporado a la tubería hilo calefactor y adicionalmente se la ha aislado térmicamente, con ello se evita el enfriamiento del gas y por tanto la condensación del vapor de agua que podría causar una inundación en la MEA de la pila de combustible.



Figura 4.9. Sistema físico de control de humedad y temperatura de los gases en ánodo y cátodo.

La Figura 4.9, muestra el sistema físico de humectación desarrollado e implementado, que consta de los siguientes dispositivos adicionales:

- sensor de nivel que actúa como seguridad del sistema de regulación de temperatura del agua des-ionizada, garantizando la desconexión eléctrica de las resistencias calefactores en ausencia de agua des-ionizada evitando daños irreversibles en las resistencias calefactores.

- visor de tubo transparente, de poliamida, que permite visualizar el nivel de agua del humectador.

▪ Acondicionamiento térmico de la pila.

Resulta de gran utilidad, poder calentar la pila ya que sus prestaciones dependen en gran medida de la temperatura. Esto se debe a que la resistencia del Nafión disminuye notablemente al aumentar la temperatura, mientras se mantenga adecuadamente hidratada. De hecho, este tipo de tecnologías requieren trabajar en dos fases para llegar a producir electricidad. Por ello, es necesario disponer de un sistema de gestión térmica de la pila que pueda operar en sus dos fases:

- *Fase I:* aportar energía calorífica a la pila hasta alcanzar su temperatura de operación (temperatura de referencia).
- *Fase II:* disipar la energía calorífica generada en la pila de combustible por efecto de las reacciones electroquímicas de los gases en la zona de catálisis durante el funcionamiento de la pila. De hecho, la pila de combustible no es eficiente al cien por cien, pues, solo una parte se aprovecha como energía eléctrica [James L. y Andrew D, 2000], y la otra se disipa en calor.

Para la regulación de estas fases en la operación de la pila, existen varios sistemas, en función de la potencia de la pila: potencias bajas (monoceldas), potencias altas (stack). El inconveniente que presentan estos sistemas es la dificultad de integración en un control central que permita ir más allá de una simple caracterización de la pila. En esta tesis se incorporan dos sistemas de acondicionamiento térmico que cubren un amplio intervalo de potencias.

Potencias bajas: monoceldas.

En muchos de los casos las pilas de combustible de baja potencia (inferior a 200W) no disipan la potencia necesaria para calentarse por sí solas. Para elevar su temperatura desde el estado inicial hasta su estado de operación, ha sido necesaria la utilización de esterillas o resistencias calefactores RC-FC, adheridas sobre las placas terminales de la pila. Estas esterillas calefactores aportan el calor necesario a la pila mediante la modulación de ancho de pulso aplicado a un relé de estado sólido, Figura 4.10.

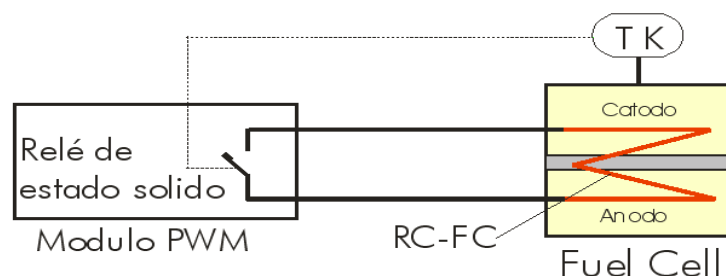


Figura 4.10 Sistema de control térmico de una pila de combustible de baja potencia.

La potencia y tamaño de las esterillas depende de la propia pila, especialmente del área activa y del material utilizado en las placas bipolares. En la Figura 4.11 se muestra el sistema calefactor acoplado a la pila de combustible.

Para estas potencias no es necesaria utilizar un sistema de refrigeración forzada, el calor producido por las reacciones electroquímicas en la pila de combustible es disipado por convección natural a través de la radiación en las placas bipolares, al ser mayor que el calor generado por la propia pila.

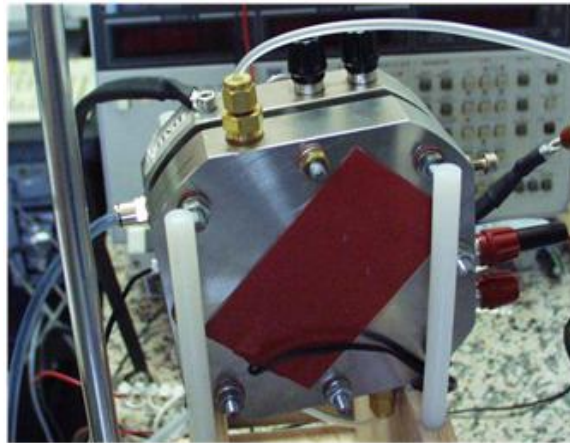


Figura 4.11. Esterilla calefactora utilizada para elevar la temperatura de una pila de baja potencia.

Potencias medias: Stack.

Para potencias superiores a 500W, la proporción de calor disipado por convección libre es baja alrededor de la superficie de las placas bipolares de la pila de combustible, es necesario recurrir a sistemas de refrigeración forzada. El sistema de refrigeración diseñado se muestra en la Figura 4.12.

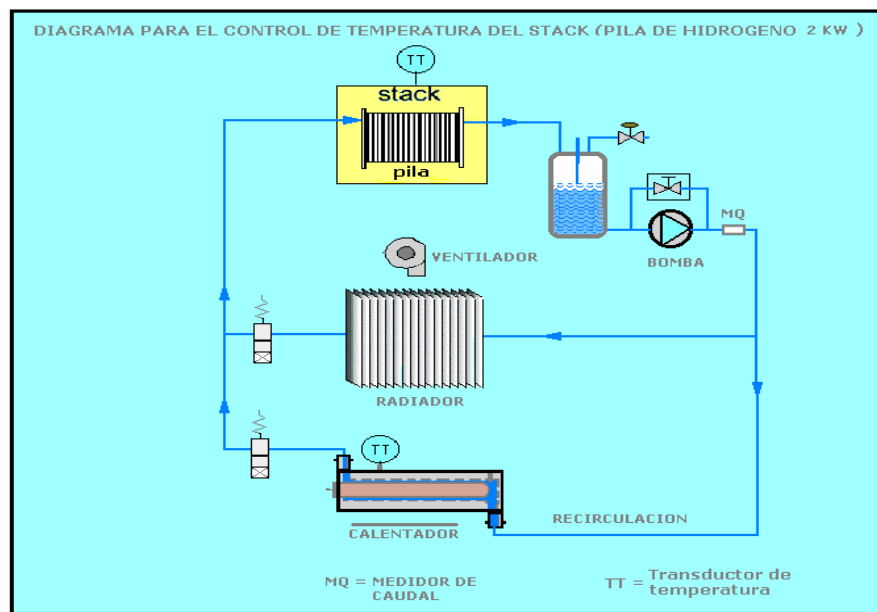


Figura 4.12. Sistema de control térmico implementado para pilas PEM de potencia media.

El sistema consta de: un *módulo calentador* que permite elevar la temperatura de la pila hasta su valor de operación y compuesto principalmente por una resistencia calefactora; un *módulo de liberación de calor* por convección forzada que consta de un radiador con ventilación incorporada; y un *módulo de llenado y bombeo* compuesto por: una bomba, un depósito y dos electroválvulas para fluidos. Este módulo permite el intercambio de calor a través del fluido (agua des-ionizada) entre: el módulo calentador, el módulo de liberación de calor y la pila de combustible. Su secuencia de operación consta de tres pasos, Figura 4.13.

- *Start-up*-. En la fase inicial es necesario la utilización de una resistencia de precalentamiento para ajustar la temperatura de la pila al valor de referencia antes de iniciar la operación de la pila (módulo calefactor – ON).
- *Recirculación*-. En el instante en que la temperatura de la pila se encuentra en el intervalo de valores especificados se realiza una recirculación del fluido a través de la resistencia de precalentamiento (módulo calefactor – OFF).
- *Refrigeración*-. Si se supera la temperatura de consigna, se activa el módulo de liberación de calor hasta alcanzar nuevamente el valor de consigna.

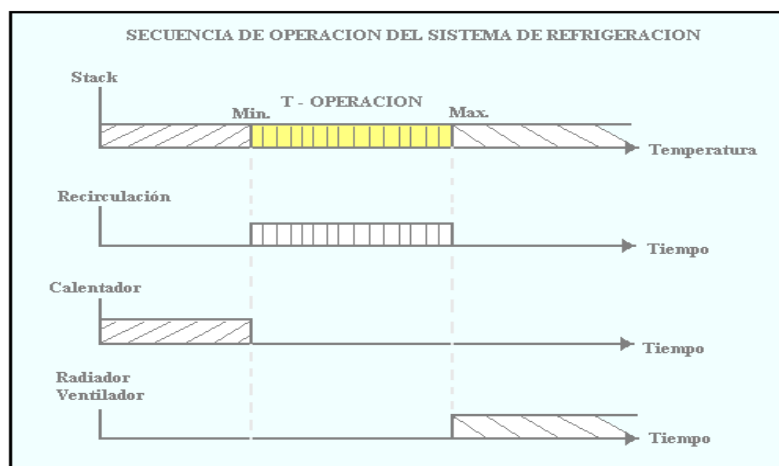


Figura 4.13. Secuencia de operación de la gestión térmica de una pila de potencia media.

El agua refrigerante es fundamental en pilas de potencias altas para la transferencia de calor de la pila de combustible. Se suele utilizar agua destilada o des-ionizada. Además, es necesario medir la conductividad del refrigerante periódicamente, ya que su valor no debe superar 1/200 ohmios.cm. La Figura 4.14 presenta la implementación del sistema de acondicionamiento térmico para pilas de combustible de hasta 2000W.

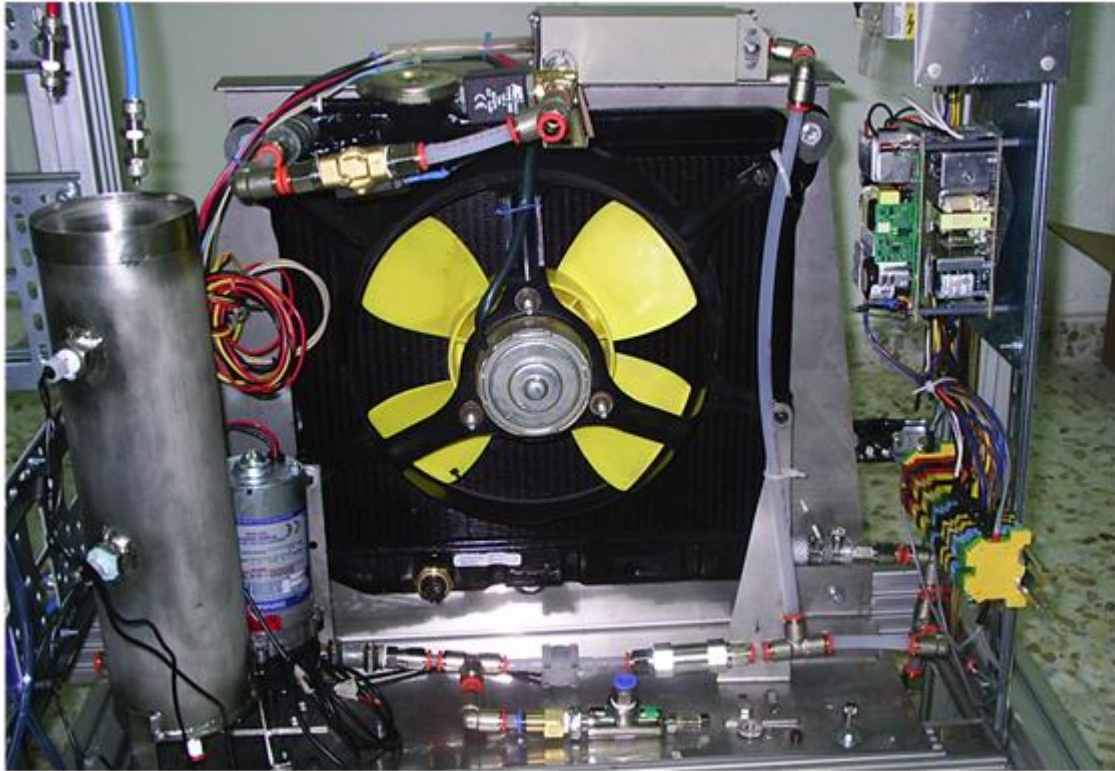


Figura 4.14. Sistema físico de gestión térmica diseñado e implementado para una pila de potencia media.

4.2.3. Control de carga eléctrica

Un punto no resuelto adecuadamente es el del acoplamiento en tiempo real entre las variables de acondicionamiento de los fluidos en la alimentación de la pila, y los parámetros que determinan su comportamiento eléctrico ante una carga eléctrica externa variable. Por ello, se ha incorporado al sistema de control una carga eléctrica variable para el cálculo automático de las curvas de polarización (relación Voltaje-Intensidad en unas determinadas condiciones) y la gestión del balance de agua en la pila. Esto conlleva un menor coste de tiempo y garantiza que los tiempos de conmutación sean siempre iguales, para comparar distintos ensamblajes membrana-electrodos (MEAs), placas terminales.

El diseño de un sistema de carga eléctrica varía significativamente dependiendo de la energía a disipar y de los valores de carga a aplicar, esto es:

- Carga discreta para potencias bajas.
- Carga continua, especialmente para potencias medias y altas.

▪ Carga discreta conmutada para bajas potencia.

La entrega no-lineal de potencia de este generador eléctrico, exige que el diseño de la carga se desarrolle a partir del modelado típico de respuesta de una pila de combustible. Esto es, la tensión generada por una pila PEM es baja, 0.6 – 0.7 voltios, con corrientes elevadas, 20 A,

dependiendo del área activa de la membrana, lo cual es problemático desde el punto de vista de la instrumentación. Una solución posible, es la carga conmutada. La secuencia conmutada de resistencias permite obtener la curva de polarización Voltaje-Intensidad de una pila en todo su intervalo dinámico y con el número necesario de puntos para tener información lo más completa posible.

Para su diseño se utiliza un modelo ideal, Anexo I.3, donde los puntos fundamentales a tener en cuenta en la red resistiva son:

- Minimización del valor resistivo de los contactos de relés y conducciones eléctricas.
- Maximización de información por número de componentes.
- Óptima disipación de potencia.
- No focalización de las fuentes de calor en un número reducido de resistencias.
- Minimización del coste de los componentes.

Una solución al primer punto consiste en aplicar a la celda de combustible bloques de resistencias conectadas en paralelo. De esta manera se minimizan los valores resistivos de los contactos de los relays y de las conexiones. Una red de resistencias en paralelo de valores iguales a R_u :

$$R = \frac{n}{R_u} \quad (4.5)$$

Donde: n es el número de resistencias en paralelo.

El tiempo de conmutación de carga, está diseñado para que en cada ciclo de medida se aplique la resistencia correspondiente durante 20 segundos, Figura 4.15. Es el tiempo de estabilización de la pila de combustible cada vez que se conmuta una resistencia. El tiempo entre dos ciclos de medida es de 50 segundos, necesario para la recuperación de la pila tras la entrega de potencia. Los tiempos de medida y estabilización de la pila se pueden cambiar en la aplicación de interfaz con el usuario.

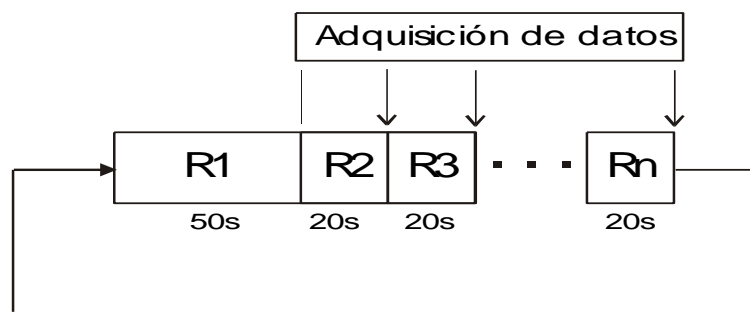


Figura 4.15. Secuencia de tiempos de conmutación de la carga y adquisición de datos.

El módulo de de carga incorporado está diseñado para controlar la conmutación de las diferentes resistencias de potencia y está compuesto por una etapa de control y otra de potencia. El esquema general del sistema de control y bloques de resistencias del sistema de carga electrónica, se muestra en la Figura 4.16.

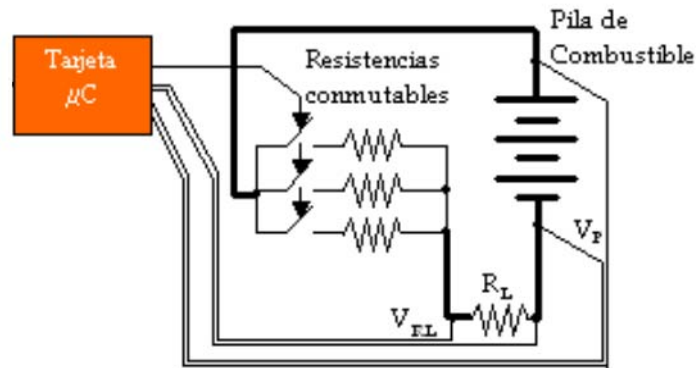


Figura 4.16. Esquema general del sistema de carga electrónica con resistencias conmutadas

El sistema de control consta de un microcontrolador que gestiona todas las secuencias de carga a aplicar a la pila de combustible para los diferentes ensayos, y la electrónica de acondicionamiento de las señales eléctricas: voltaje, corriente y temperatura. La etapa de potencia está compuesta por:

- un bloque de dispositivos opto-acopladores para obtener un aislamiento galvánico entre los elementos de potencia y la electrónica de control.
- bloques de resistencias de potencia conectados en paralelo y en serie.
- relays de potencia para conmutar la carga, que serán sometidos a corrientes inferiores aumentando así la durabilidad de los componentes.

La distribución de la corriente entre las resistencias conmutadas en paralelo favorece la disipación del calor en las resistencias, evitando el uso de resistencias con altas potencias de disipación, lo que reduce el coste de los componentes.

Los componentes del sistema de control de la carga, se presentan en la Figura 4.17: relés, circuitos integrados, sensor de corriente por efecto hall, resistencias de potencia y cables de conexión con las placas bipolares de la pila de combustible.



Figura 4.17. Sistema de carga electrónica incorporado al control integral de pilas.

- **Carga continua para potencias medias-altas.**

Se ha diseñado una carga electrónica para potencia medias altas mediante: a) Red de resistencias conmutadas, pues el planteamiento descrito para potencias bajas es extensible a cargas eléctricas para pilas de alta potencia. Sin embargo, aquí la disipación de calor constituye un punto crítico, que no es objeto de este trabajo. b) Red de resistencias variables mediante dispositivos semiconductores (carga continua). La carga continua permite la obtención de la curva de polarización de la pila de combustible, en todo su dominio.

Los dispositivos semiconductores MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) de resistencia variable permiten controlar la corriente que atraviesa desde el drenador al surtidor mediante una tensión aplicada en la puerta. Si se analiza la curva característica de corriente drenador I_d vs el voltaje de entrada aplicada a la puerta V_{in} de los semiconductores FET, se puede observar que la corriente I_d se ve afectada solo por el voltaje de entrada a la puerta V_{in} . A partir de un determinado umbral de voltaje V_{D-S} , este voltaje será entregado por la pila de combustible, Eq (4.6). El esquema general del sistema de control de carga eléctrica, se muestra en la Figura 4.18.

$$I_d = f(V_{in}) \quad (4.5V < V_{pila}) \quad (4.6)$$

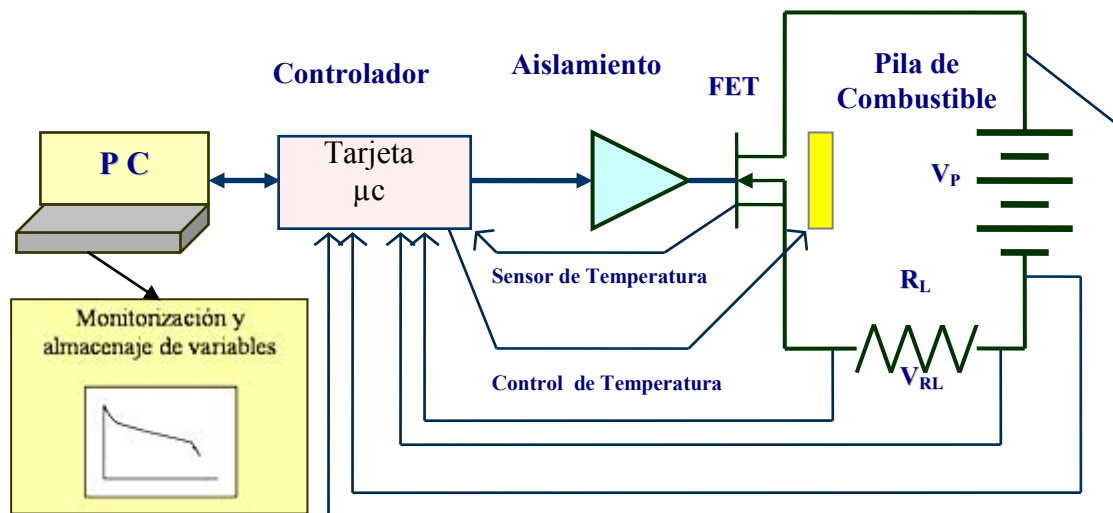


Figura 4.18. Esquema general del sistema de control de carga eléctrica con FET de potencia.

La Figura 4.19 muestra la conexión serie de seis tarjetas electrónicas implementadas siguiendo el esquema general de la Figura 4.18. En estas tarjetas, se conectan los FET's, en serie o paralelo dependiendo de la potencia a disipar o corriente máxima del dispositivo semiconductor. El diseño de este tipo de carga electrónica sigue los mismos criterios que el de las cargas conmutadas. Este tipo de carga exige un control adecuado de la temperatura ya que el efecto de deriva térmica es mayor en el dispositivo semiconductor.

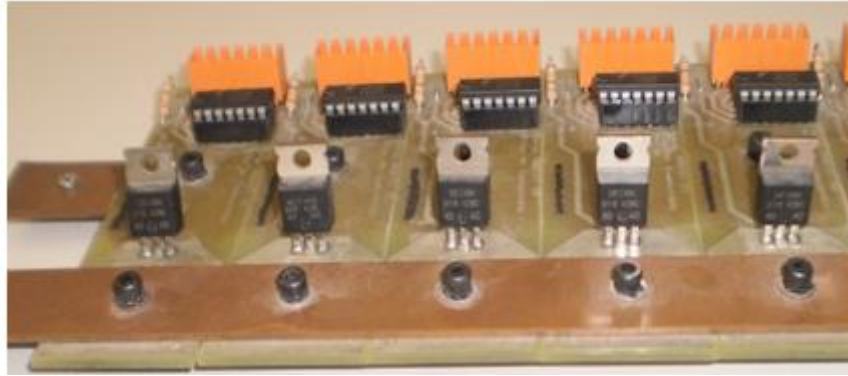


Figura 4.19. Carga eléctrica con dispositivos FET de potencia.

4.3. Sistema sensorial

El funcionamiento óptimo autónomo de la pila de combustible PEM requiere un control en lazo cerrado o realimentado con información relativa, tanto a las variables de estado de la pila como a las variables eléctricas de salida de la misma. Teniendo en cuenta las características de los actuadores seleccionados, es necesario incorporar sensores que proporcionen en cada instante el valor de la variable de estado a controlar. Igualmente, a fin de disponer de un conocimiento aproximado del estado de operación de la pila, se propone en el Capítulo 5 aplicar a la pila un conjunto de perturbaciones o estímulos para analizar su respuesta eléctrica en tiempo real. En ambos casos se trata de sensores propioceptivos que indican la evolución temporal del sistema pila de combustible.

Al igual que con los actuadores, la selección de los sensores depende de los objetivos que se pretende abordar. Así, en este caso, al tratarse del control autónomo de la pila de combustible PEM, ya sea para su caracterización y estudio como para su operación en aplicaciones concretas, hay que considerar que la pila PEM debe operar, mientras reciba combustible, muchas horas de forma óptima. Además, hay que considerar aquellas aplicaciones más complejas como es el caso de un vehículo donde las condiciones de solicitud de carga muestran un alto grado de variabilidad tanto en potencia como en consumos de combustible. Esta variabilidad incrementa la dificultad tanto del control del balance de agua en la pila como del proceso de análisis e interpretación de las señales sensoriales, por lo que se requiere un sistema sensorial multivariable, fiable y robusto, que permita estimar en tiempo real el estado de operación de la pila PEM. En cualquier caso algunas de las consideraciones generales a evaluar en el proceso de selección de los sensores son las siguientes:

- **Frecuencia de muestreo.**

Cada sensor proporciona las medidas con una frecuencia máxima, tanto en funcionamiento continuo como bajo petición. Por ello, es fundamental verificar este límite ante los objetivos que se persiguen. Así, un sistema de detección de estado de operación

con una resolución temporal de 25 min. es adecuado para poder actuar y llevar a la pila al estado de referencia.

- **Precisión**

Cada sensor lleva asociado un error nominal en las medidas, que conviene verificar experimentalmente. En este caso esto no es demasiado crítico debido a la incertidumbre en la interrelación entre subsistemas de la pila.

- **Proceso de la señal.**

El procesado inicial de la señal, como puede ser un filtrado, facilita su posterior interpretación, teniendo en cuenta que los recursos computacionales en la pila para aplicaciones embarcadas son limitados. Por ello es importante tener en cuenta el tiempo de proceso necesario para extraer información relevante de los datos crudos del sensor.

- **Coste, consumo, dimensiones y peso**

Los sensores deben tener un consumo energético, dimensiones y peso adecuados a las características de la aplicación, siendo conveniente que todos sean lo más reducidos posible en aplicaciones móviles. El coste es un parámetro adicional que hay que considerar en cuanto al valor añadido final al sistema completo de suministro de energía con pilas de combustible.

Las técnicas de estimación del estado de operación de la pila pueden dividirse en dos grupos, en función del grado de acondicionamiento de la señal utilizada para su estimación:

1. *Medidas directas proporcionadas por los sensores.* Se adquieren los valores de las variables de forma directa desde el sensor o transductor con la única necesidad de realizar la conversión eléctrica a valor de la variable correspondiente, que permiten cerrar los lazos de control de la pila. Se dividen en dos grupos: *variables de entrada* que corresponden a las variables de operación de la pila, y *variables de salida* o respuesta eléctrica de la pila.
2. *Medidas indirectas del estado de operación de la pila.* Como son la curva de polarización (V-I), las técnicas de percepción del estado o del rendimiento óptimo de la pila PEM. Estas técnicas hacen uso de las medidas directas y permiten el funcionamiento óptimo autónomo de la pila PEM. La implementación y utilización de estas técnicas se describe en el Capítulo 5 de la memoria.

La Tabla 4.2 presenta las técnicas de medida directa e indirecta implementadas para el control óptimo autónomo de la pila PEM.

Tabla 4.2 Técnicas directas e indirectas de medida de variables de estado de la pila.

| Técnicas directas de medida | | Técnicas indirectas de medida |
|---------------------------------------|-----------------------|---|
| VARIABLES DE ENTRADA | VARIABLES DE SALIDA | Curva de polarización V-i. |
| Caudal, Presión, Temperatura, Humedad | Voltaje Intensidad | Perturbaciones para la detección del estado de humedad de la pila |

| | | |
|--|--|----------------------------------|
| | | Calculo de la potencia generada. |
|--|--|----------------------------------|

A continuación se describen los sistemas de control de las variables de estado de la pila, indispensables para la consecución de un sistema autónomo de control de la pila con funcionamiento óptimo. El término óptimo dependerá de la aplicación concreta a abordar y que puede ser potencia, eficiencia u otros.

4.4. Controladores de variable única

El funcionamiento desasistido de la pila de combustible PEM implica la actuación directa y automática sobre las variables de operación de la pila, y de manera indirecta sobre el control de estado de operación de la pila, control de alertas o parada, y control de rendimiento óptimo.

En el apartado 4.2 de la memoria, *sistemas de actuación*, se presentó una descripción y análisis del sistema de regulación implementado para cada variable a controlar, encontrándose que los sistemas de actuación son todo/nada y que la variable que determina la acción de control en cada uno de los sistemas analizados, es el intervalo de tiempo en que el actuador se mantiene activo. Estos sistemas presentan un modelo aproximado de orden bajo y la actuación sobre cada sistema es inmediata a través de una sola variable, puesto que únicamente se persigue el control independiente de cada una de ellas, lo que indica que nos encontramos frente a sistemas de una entrada y una salida, SISO (single input – single output), de múltiples variables, como son: caudal, presión, temperatura, nivel de humedad y carga eléctrica.

El controlador a implementar actuará sobre cada proceso en un lazo de realimentación cuyo objetivo es conseguir que la salida siga lo más posible el valor de entrada, ante perturbaciones imprevistas. El sistema de control puede utilizar distintas estrategias, para decidir el valor de la señal de control. Sin embargo, es habitual, dadas las características descritas de los sistemas de regulación de las variables de estado de la pila PEM, incorporar un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) como elemento base de la estrategia de control. Figura 4.20. El desarrollo de su implementación se describe en la sección 4.3.1.

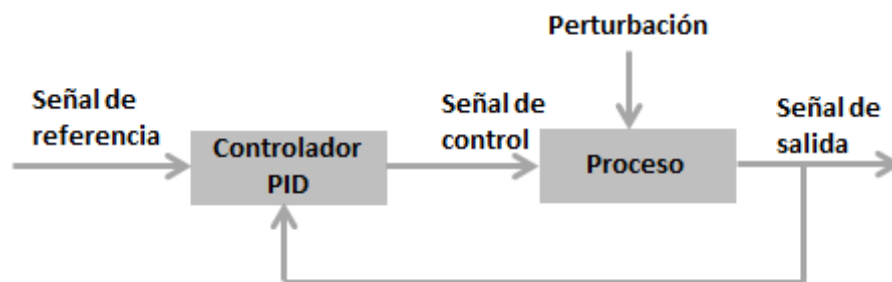


Figura 4.20. Esquema de control PID realimentado, implementado para controlar las variables de estado.

Sin embargo, el sistema de control del estado de operación de la pila PEM, o el de su rendimiento óptimo, requieren unas estrategias de control más complejas ya que es necesario estimar el estado de operación de pila durante su funcionamiento y bajo diferentes condiciones de operación. Un control en lazo abierto de estos sistemas de actuación resulta inviable debido a las condiciones variables de operación y la compleja interrelación entre ellas. De ahí que se requiera un sistema de gestión global capaz de estimar su estado de operación primero y posteriormente controlar y mantener unas condiciones óptimas de funcionamiento de la pila PEM. Estos sistemas se describen en los Capítulos 5 y 6 respectivamente.

4.4.1. Control clásico PID múltivariable

Los controladores más utilizados en aplicaciones industriales son del tipo PID. Se caracterizan por tener una función de transferencia del tipo mostrado en la Eq. (4.7), [40].

$$G_c(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (4.7)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d el tiempo derivativo. Si en una representación espacio-temporal, la entrada al controlador es el error $e(t)$, la señal de salida de control correspondiente sigue la expresión formulada en la Eq. (4.8).

$$\mu(t) = k \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.8)$$

En consecuencia la acción de control de un controlador PID es función del error de la señal de referencia, de su variación en dos instantes consecutivos, y del error acumulado en el tiempo. El diseño de un controlador PID para una planta o sistema, tiene por objetivo determinar los valores de las constantes K_p , T_i y T_d , que permiten obtener la salida deseada en todo el espacio de estados del sistema. El término proporcional k_p varía la señal de control según el error detectado, desplazando al sistema hacia el subespacio de estados donde se encuentra el valor objetivo. Sin embargo, presenta una desviación aunque transcurra un tiempo infinito, que se obtiene aplicando el Teorema de Valor Final a la salida del sistema.

La desviación presente en el controlador proporcional desaparece si la función de transferencia del controlador contiene al menos un integrador. Debido a este término integral T_i , la variable de control $\mu(t)$ no se mantendrá constante mientras el error $e(t)$ no se anule. Sin embargo el uso de un control que solo tuviera el término integral llevaría generalmente a un bucle inestable. Por ello interesa combinar los términos proporcional e integral. Finalmente, el término derivativo T_d , es útil cuando el desfase en el proceso a controlar es excesivo. Sin embargo, en la práctica se utiliza mucho menos que los otros términos, [Ogata K., 1998].

La implementación del controlador PID en un microprocesador para realizar las tareas de control de manera automática, exige disponer del controlador en forma digital. La diferencia al implementar un controlador digital es que en lugar de trabajar con señales continuas, el

controlador toma a la salida del sistema una secuencia de valores a intervalos de muestreo T y genera una secuencia de valores de la señal de control. Por tanto, se debe realizar una aproximación discreta del algoritmo PID y tendrá gran importancia la elección del intervalo de muestreo T. En primera aproximación, la señal de control sigue la expresión dada por la Eq. (4.8):

$$\mu_k = k \left[e_k + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^k e_i \cdot T + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right] \quad (4.9)$$

Normalmente no se utiliza esta expresión, sino que se calcula el incremento de u_k en cada muestreo, con lo que se simplifica el cálculo. Calculando la Eq. (4.9) en el intervalo $k-1$, y restando las ecuaciones ($u_k - u_{k-1}$), se obtiene la Eq (4.10):

$$\mu_k = \mu_{k-1} + k \left[(e_k - e_{k-1}) + \frac{1}{T_i} e_k T + T_d \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T} \right] \quad (4.10)$$

En realidad, esta aproximación supone que la variable permanece constante durante el intervalo de muestreo y por ello suele denominarse integración rectangular. El PID digital diseñado se ha implementado utilizando esta integración rectangular.

Debido a la extensión de los algoritmos, se desarrollaron inicialmente los programas en lenguaje C y se utilizó un compilador cruzado (PICC) para generar los ejecutables antes de su ubicación definitiva en el correspondiente microprocesador.

▪ **Análisis del controlador PID simulado en la estabilización de la presión.**

La regulación de presión en los gases de alimentación de la pila PEM debe presentar alta estabilidad ante perturbaciones y mantenerse dentro de unos límites del valor de referencia [$\pm 10\%$]. Fluctuaciones en su regulación producen diferencias de presión entre ánodo y cátodo que puede llegar a deteriorar la membrana polimérica debido a la utilización de placas corrugadas cruzadas como dispositivos de distribución de gas en la pila.

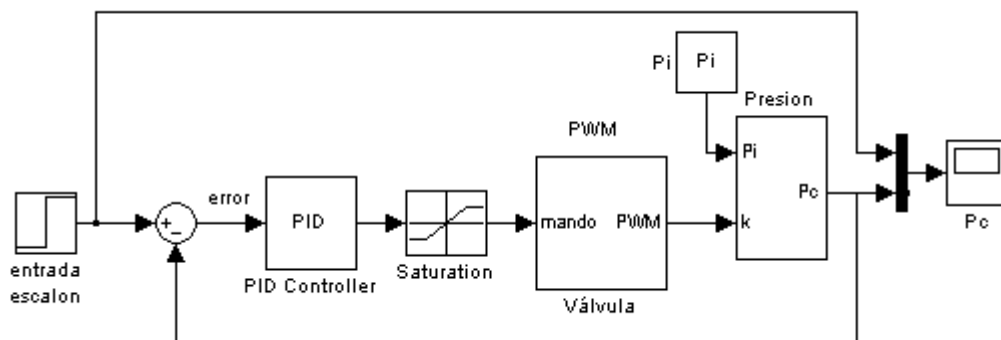


Figura 4.21. Diagrama de bloques del sistema de regulación de presión.

Para analizar la viabilidad del sistema de actuación de esta variable y la robustez del controlador PID en regular dicha variable, se procede en una primera fase a la simulación y

análisis de la respuesta ante una señal tipo escalón. Para ello, se ha procedido a modelar en Simulink (Mat-Lab) el sistema de actuación (PWM en línea) de la regulación de presión, incorporando el controlador PID, Figura 4.21.

Para construir tal sistema, se procede a reordenar las funciones de transferencia presentes en la Eq. (4.2). La presión P_c , a controlar a la entrada de la pila de combustible, viene dada por la Eq. (4.11).

$$P_c(s) = \frac{1}{RCs} \left[P_i - P_c \left(1 + k \frac{R}{R1} \right) \right] \quad (4.11)$$

Donde: P_i es la presión de entrada en la línea de suministro del gas oxidante; R y $R1$ son las resistencias al flujo de gas, y; el término k representa el estado de funcionamiento de la válvula controlada con la modulación de ancho de pulso tomando solo dos valores:

- 0 válvula cerrada
- 1 válvula abierta

En el modelo se ha introducido el bloque PWM que tiene como entrada la señal de control proveniente del controlador PID, incorporado en las librerías de Simulink de MatLab. Finalmente, se ha introducido el bloque de saturación (elimina el efecto win-up) para limitar la acción integral.

La respuesta dinámica de la presión a la entrada a la pila de combustible PEM obtenida al aplicar al sistema una señal escalón con amplitud 2 bares, utilizando un control PID, y las fluctuaciones obtenidas en la presión, como respuesta característica en la modulación toda-nada, se presentan en la Figura 4.22.

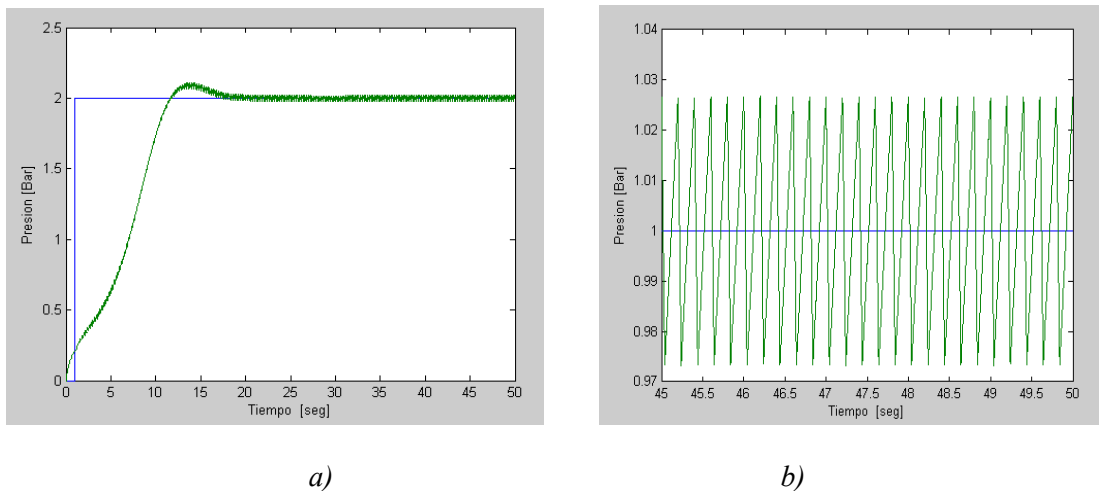


Figura 4.22. Resultados de la simulación en la regulación de presión a la entrada de una pila, utilizando el método PWM. a) Respuesta de la presión ante una entrada escalón, b) fluctuaciones en la presión.

▪ **Resultados reales en la estabilización de presión, control PWM en línea.**

Se han realizado ensayos reales para analizar la respuesta del controlador PID aplicado a la modulación de ancho de pulso a la válvula de membrana. Esto es, para la regulación de la

presión en la línea principal del gas en el lado del cátodo. Uno de los resultados obtenidos durante el funcionamiento de la pila de combustible polimérica, en la que, como gas principal se utilizó oxígeno con un caudal de 0.5 L/min, se muestra en la Figura 4.23a. Estos resultados se han obtenido para valores de consigna de la presión, en el lado del cátodo, de 1, 2, 3 y 4 bares.

Los resultados obtenidos en la simulación y en los ensayos reales son prácticamente idénticos. Lo que indica que el controlador PID permite seguir la referencia y, que el sistema de actuación modulación de ancho de pulso, PWM, en línea para regular la presión, introduce un ligero rizado, característico de este tipo de control, Figura 4.23b.

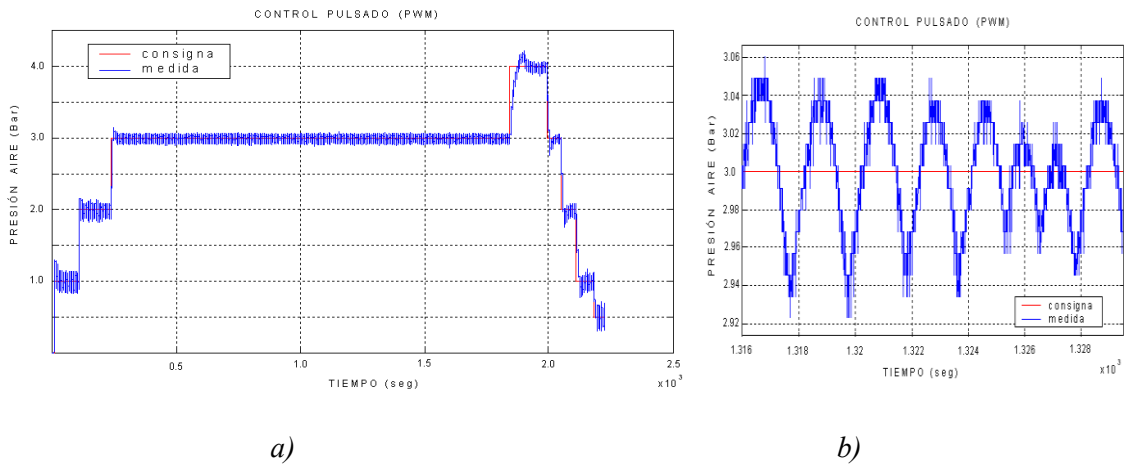


Figura 4.23. Resultados del controlador PID en la regulación de presión a la entrada de una pila, método PWM. a) Respuesta dinámica real de la presión P_c ante un cambio de consigna, b) fluctuaciones en la presión, características en la modulación todo/nada.

▪ **Resultados reales en la estabilización de presión, control CONTINUO en línea.**

Los mejores resultados se han obtenido con el sistema de actuación continua en línea para la regulación de presión en la entrada de la pila de combustible, como se puede apreciar en la Figura 4.24, para una presión de referencia de 1 bar y un flujo de caudal anódico de 0.2 L/min. Con este tipo de regulación las fluctuaciones de presión características del control PWM se reducen en la línea principal de suministro de los gases reactantes a la pila PEM.

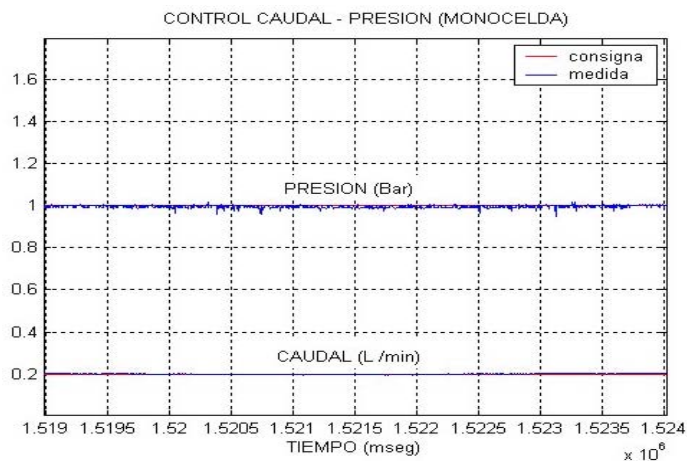


Figura 4.24. Respuesta de la variable presión en el control CONTINUO en línea.

Este tipo de regulación presenta fluctuaciones al aumentar el flujo de gas, por lo que es necesario reajustar los parámetros del controlador PID para estos nuevos valores, lo que dificulta trabajar con un intervalo amplio de potencias en las pilas de combustible.

También se pueden utilizar conjuntamente, controladores borrosos y clásicos PID para alcanzar los objetivos de control. En [Karner J. y Janocha H., 1996] se presenta un controlador borroso para optimizar los parámetros de un controlador clásico PID. Para resolver los problemas de fluctuación de presión al operar con pilas de combustible de diferente tamaño y en consecuencia distinta potencia, se propone la implementación de un pre-controlador borroso para ajustar la referencia, “falsa referencia”, del controlador clásico PID.

4.4.2. Modelo cualitativo de control en la estabilización de presión

Las bases iniciales de la Teoría de Conjuntos Borrosos fueron formuladas por L.A. Zadeh en 1965, y han experimentado desde entonces un amplio desarrollo teórico con aplicaciones en múltiples áreas del conocimiento. La teoría de Zadeh tiene por objetivo la búsqueda de modelos que permitan implementar los mecanismos de razonamiento lingüístico y cuantificar el lenguaje natural. Sin embargo, hasta 1973 Zadeh no presenta la teoría básica para el diseño de Controladores Borrosos [Zadeh, L. A., 1973]. En ella se persigue plasmar la experiencia humana de control, clasificación o toma de decisión en un modelo compuesto por un conjunto de heurísticos computacionalmente plausibles y cuantificables. En 1974 Mamdani y colaboradores desarrollan la primera aplicación de un sistema de control basado en algoritmos borrosos para regular una máquina de vapor en el laboratorio, [Mamdani, E. H., 1974]. El modelo de control borroso sigue el protocolo de control utilizado por un operario experto y se formula mediante un conjunto de reglas del tipo SI-ENTONCES. El antecedente de cada regla (parte **SI**) contiene una descripción del estado de la planta o sistema y el consecuente (parte **ENTONCES**) la acción de control apropiada.

La investigación y el desarrollo de aplicaciones reales progresan rápidamente [Mamdani, E. H. 1993], y algunas de las más difundidas corresponden a los controladores para trenes del metro desarrollados en los años 80 en Japón y los aplicados a electrodomésticos como lavadoras y a cámaras de vídeo [Hirota y (eds.), 1995]. La mayoría de estos controladores borrosos están muy relacionados con el trabajo de Mamdani, ya que no disponían de un modelo de la planta o sistema sino de un conjunto de reglas de control descritas en lenguaje natural que operan sobre términos lingüísticos que constituyen un sistema experto de control. El éxito y el continuo avance en popularidad de los controladores borrosos en la resolución de múltiples problemas se debe fundamentalmente al hecho de que la aproximación borrosa es muchas veces la única alternativa posible, ya que la teoría clásica de control es inviable cuando no se dispone de un modelo analítico preciso de la planta. En la práctica, la teoría de control clásico, para afrontar el problema de la complejidad en la descripción del sistema

también propone aproximaciones lineales que constituyen una simplificación del sistema, con muy buenos resultados.

El hecho de no tener que construir un modelo clásico de la planta o sistema, plantea las siguientes cuestiones en el diseño y análisis de controladores borrosos [Margaliot y Langholz, 2000]:

1. Cómo diseñar sistemáticamente y justificar las reglas de control
2. Cómo definir sistemáticamente las funciones de pertenencia borrosa
3. Cómo analizar propiedades del control en lazo cerrado, como la estabilidad y la robustez

El primer punto es uno de los más conflictivos y se suele resolver utilizando heurísticos basados en un buen conocimiento del sistema y de sus respuestas ante diferentes entradas (aproximación de sentido común). En el caso de que la planta o sistema se controle manualmente por un operario se puede hacer frente al problema desde dos puntos de vista:

- Extrayendo el conocimiento de control del experto en un formato de reglas lingüísticas.
- Almacenando un conjunto amplio de medidas en parejas, estado del sistema- acción de control, que permitan extraer las reglas borrosas.

Las aproximaciones utilizadas para resolver el segundo punto han conducido a la utilización de diferentes métodos para la optimización de los parámetros relativos a las funciones de pertenencia y al peso de cada regla, entre ellos se encuentran los algoritmos genéticos y las redes neuronales. Con respecto al último punto, dificultad de obtener un modelo del sistema, el análisis en lazo cerrado es prácticamente imposible excepto mediante una simulación extensiva. Esta problemática ha llevado al planteamiento de una nueva aproximación denominada control borroso basado en modelo. En ella, al igual que en teoría de control clásico, el controlador se diseña a partir de un modelo de la planta, formulado como un modelo borroso del tipo Takagi-Sugeno, que se obtiene bien a partir de una descripción heurística del comportamiento de la planta o bien a partir de un conjunto de medidas de entradas/salidas de la planta [Takagi y Sugeno, 1985].

De todas las consideraciones anteriores se deduce que el paradigma fundamental del control borroso está en sustituir el algoritmo analítico de control clásico por una base de reglas cuyas variables son términos lingüísticos modelados mediante conjuntos borrosos. La característica fundamental del modelo de control borroso frente a cualquier otro tipo de control clásico radica en la inexistencia de un modelo analítico rígido.

Ahora bien, esta afirmación no implica ausencia de un modelo, ya que en la mayoría de los casos éste reside en la mente del operario experto que mediante reglas de naturaleza imprecisa o heurística toma decisiones con información imprecisa e incompleta y obtiene buenos resultados [Klir y Folger, 1988]. Se trata pues de transcribir el conocimiento y el modo de razonar del operario a un modelo computacional que opera, en primera instancia, con términos del lenguaje natural en vez de con valores numéricos. El modelo, se encuentra embebido y distribuido en el conjunto de relaciones entre los términos lingüísticos utilizados.

En cada relación o regla se encapsula una toma de decisión sobre la clasificación o control del sistema en una región del espacio de estados.

En resumen, para analizar y controlar sistemas complejos, no lineales se necesitan aproximaciones flexibles y modulables que no se basen en un formalismo matemático rígido, sino que por el contrario empleen un marco metodológico tolerante con la imprecisión y las verdades parciales [Zadeh, L. A., 1973]. En este trabajo se utilizan las técnicas de razonamiento aproximado para afrontar las no-linealidades que presenta la pila de combustible. En el Capítulo 5 se describe el uso e implementación de un árbol de decisión borroso para estimar el estado de operación de la pila PEM en relación al contenido de agua de la membrana (MEA), al no disponer de un modelo analítico preciso.

A continuación, se describe la implementación del controlador borroso “pre-control borroso” en la estabilización de la presión en la pila de combustible. El pre-control borroso implementado es un control de referencia. Esto es, controla la referencia dada al controlador clásico PID. El objetivo es lograr una respuesta rápida en el tiempo, evitando superaciones no-deseadas de la referencia, en cualquier momento.

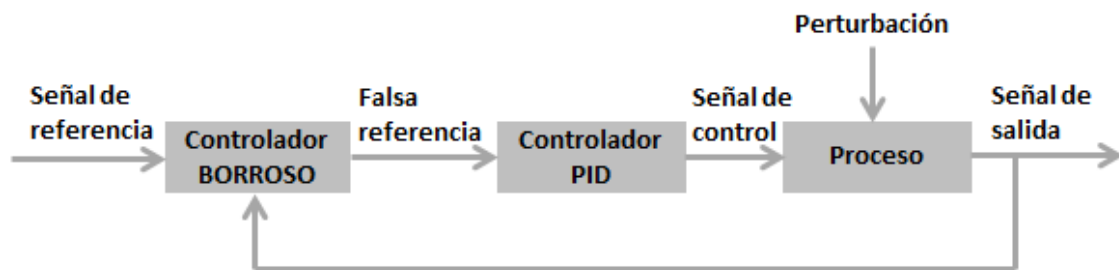


Figura 4.25. Controlador de dos etapas implementado para la estabilización de presión en la pila.

A veces los procesos de control se llevan a cabo en dos o más etapas, donde la entrada al primer controlador es el error de una variable y las entradas a los controles siguientes son las salidas del control adyacente anterior. Estos controladores son especialmente útiles cuando una de las etapas de los procesos de control es difícil de cambiar. Esto es precisamente lo que ocurre con el controlador PID implementado para la regulación de presión, donde el control se programa en un microprocesador, y cualquier ajuste de los parámetros obliga a una reprogramación del mismo. En la Figura 4.25 se muestra el diagrama de bloques del controlador de dos etapas implementado para la estabilización de presión. *El controlador borroso modifica la referencia “falsa referencia”, del controlador PID para obtener al final un control más preciso de la variable.*

Se han seleccionado dos entradas para el pre-controlador borroso:

- el incremento de presión en el tiempo ($\Delta P/\Delta t$)
- el error de presión ($P_{\text{Referencia}} - P_{\text{medida}}$)

Y una salida: el valor de referencia a añadir, “falsa referencia”.

Las variables de entrada del controlador se describen lingüísticamente mediante cinco términos, definidos por funciones de pertenencia trapezoidales, mediante el conjunto de etiquetas lingüísticas: negativo grande (NG), negativo pequeño (NP), cero (Z), positivo pequeño (PP) y positivo grande (PG), Figura 4.26. Los valores de las etiquetas de las entradas se combinan mediante operadores lógicos, como: OR, AND y NOT para calcular los niveles de salida.

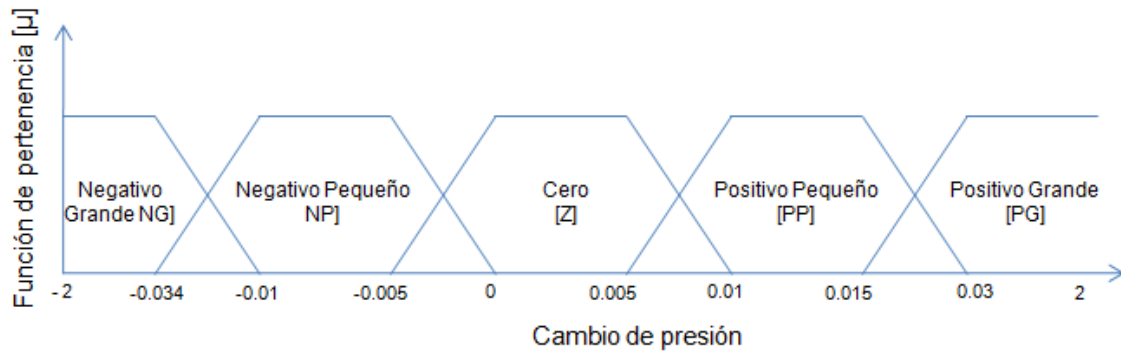


Figura 4.26. Función de pertenencia para la entrada cambio de presión.

La variable de salida del pre-controlador borroso corresponde a un valor que hay que añadir a la referencia, para crear una falsa referencia que es enviada al controlador PID. La variable de salida “falsa referencia” está definida por cinco etiquetas lingüísticas con los mismos nombres de las entradas: negativo grande (NG), negativo pequeño (NP), cero (Z), positivo pequeño (PP) y positivo grande (PG).

▪ **Base de conocimiento.**

Las reglas borrosas del pre-controlador, que cualitativamente modelan el sistema, muestran una fuerte dependencia de la salida sobre la velocidad de cambio de la presión, ya que esta última es una medida relevante de cómo la variable de estado presión va a exceder la falsa referencia.

A continuación se formulan cuatro de las veinticinco reglas borrosas que constituyen el modelo:

- R1: IF (camb_presion = NG) AND (error = NG) THEN (falsa_ref = PG)
- R2: IF (camb_presión = NG) AND (error = PG) THEN (falsa_ref = PP)
- R3: IF (camb_presion = NP) AND (error = PG) THEN (falsa_ref = Z)
- R4: IF (camb_presion = Z) AND (error = PG) THEN (falsa_ref = NP)

El pre-controlador borroso se ha implementado utilizando Fuzzylib [García-Alegre M.C. 1992]. Este calcula la salida del sistema de control borroso a partir de las entradas en tiempo real de las variables borrosas, etiquetas lingüísticas y reglas borrosas IF-THEN. Las variables, etiquetas y reglas se leen desde un archivo previamente diseñado, que encapsula el modelo cualitativo del sistema, Figura 4.27.

```

# Fichero con los datos del pre-controlador borroso.
etiqueta camb_presion NG = -4 -2 -0.03 -0.01
etiqueta camb_presion NP = -0.03 -0.015 -0.005 0
etiqueta camb_presion Z = -0.01 -0.005 0.005 0.01
etiqueta camb_presion PP = 0 0.005 0.015 0.03
etiqueta camb_presion PG = 0.01 0.03 2 4

etiqueta error NG = -10.1 -10 -3 -1.1
etiqueta error NP = -3 -1.5 -0.5 0
etiqueta error Z = -1 -0.2 0.2 1
etiqueta error PP = 0 0.5 1.5 3
etiqueta error PG = 1.1 3 10 10.1

etiqueta falsa_ref NG = -0.15 -0.05 0.05 0.15
etiqueta falsa_ref NP = -0.15 -0.05 0.05 0.15
etiqueta falsa_ref Z = -0.15 -0.05 0.05 0.15
etiqueta falsa_ref PP = -0.15 -0.05 0.05 0.15
etiqueta falsa_ref PG = -0.15 -0.05 0.05 0.15

```

Figura 4.27 Fichero de texto con las etiquetas lingüísticas asignadas a las variables borrosas.

4.4.3. Análisis comparativo en la estabilización de presión

Para valorar el funcionamiento del pre-controlador borroso se han tenido en cuenta dos parámetros: el error estacionario e_{ss} y el tiempo de retardo t_d . Estos parámetros se utilizan normalmente en Teoría de Control para cuantificar la precisión y la velocidad del sistema, respectivamente, [33]. El tiempo de retardo es el tiempo que requiere el sistema para alcanzar la mitad del valor de referencia (4.12).

$$t_d \Rightarrow \frac{\text{Referencia}}{2} \quad (4.12)$$

El error estacionario es la diferencia entre el valor de presión medido y la referencia solicitada una vez que ha finalizado el periodo transitorio (4.13).

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t_d) \quad (4.13)$$

En la Figura 4.28 se aprecia la evolución temporal de la presión a la entrada de la pila de combustible utilizando el controlador clásico PID. Los resultados de la gráfica muestran que el controlador no cumple con las especificaciones para un caudal de 1L/min, esto es: aunque responde a la función escalón en unos cientos de segundos ($t_d = 100s$), presenta un porcentaje de sobrepaso máximo de 22 %. El comportamiento es subamortiguado, con algunas oscilaciones hasta que la presión medida se estabiliza cerca del valor de referencia ($e_{ss} = 0.06$ bar), con un tiempo de estabilización de 402 s. Sin embargo, el control de presión en la pila de

combustible interesa que muestre un comportamiento sobreamortiguado para evitar diferencias de presión excesivas en la membrana, que pueden dañarla de forma irreversible; en especial si se trabaja con pilas de combustible de lámina corrugada.

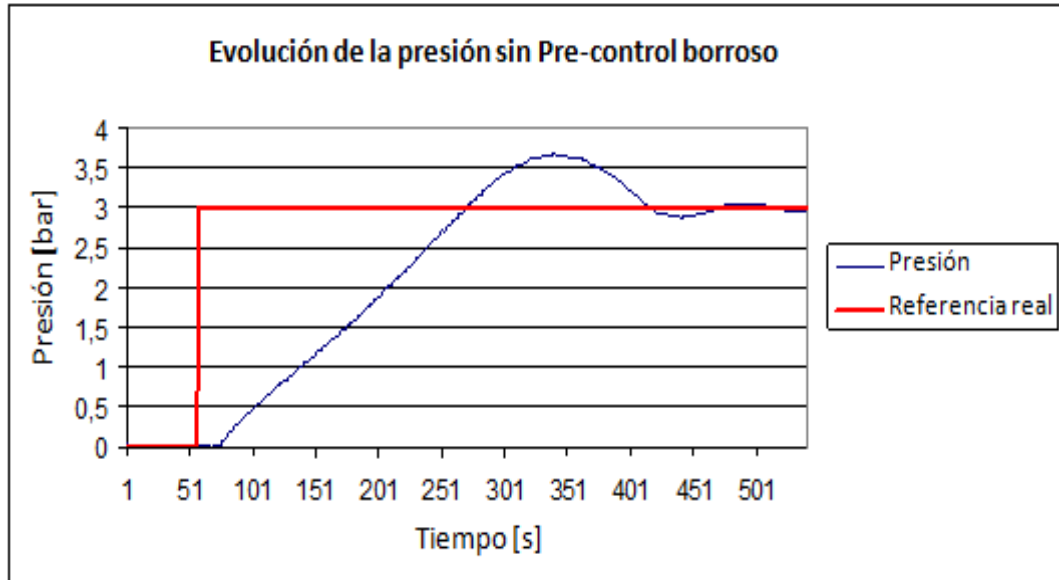


Figura 4.28. Evolución temporal de la presión con un controlador PID clásico.

Los resultados obtenidos al utilizar el controlador borroso “pre-controlador borroso” en la estabilización de presión, bajo las mismas condiciones de caudal y salto escalón (3 bares) se muestran en la Figura 4.29. Se aprecia ahora como el comportamiento del sistema es sobreamortiguado, esto es, la presión no excede al valor de referencia, y el tiempo de estabilización es de 228 segundos.

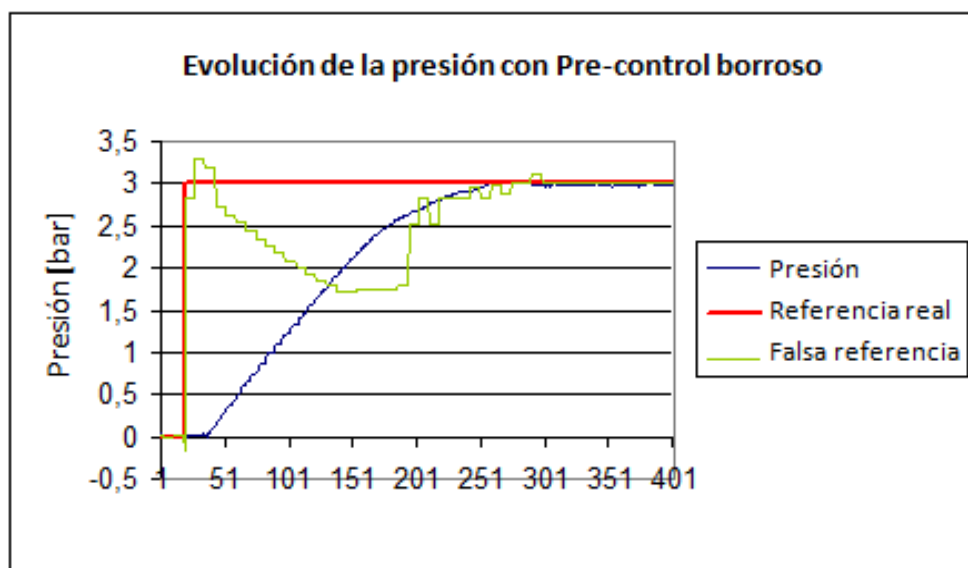


Figura 4.29. Evolución temporal de la presión con la etapa del pre-controlador borroso.

Por tanto, la incorporación del pre-controlador borroso logra la estabilización en poco tiempo y evita oscilaciones y excesos de presión a la entrada de la pila de combustible. Esto ocurre porque el pre-controlador borroso genera una falsa referencia mucho menor cuando la presión medida se aproxima a la referencia, reduciendo la velocidad de incremento de la presión medida. Esto es, tan pronto como el pre-controlador detecta la desaceleración, aumenta el valor de la falsa referencia. Acorde con la rapidez de cambio de la presión medida, el pre-controlador continúa variando la falsa referencia hasta alcanzar la referencia objetivo.

El pre-controlador borroso operando en cooperación con el controlador clásico PID a bajo nivel, ha demostrado un rendimiento mucho mejor en la estabilización de la presión que el controlador clásico PID. Además, el pre-controlador borroso evita excesos de presión sobre la referencia, así como oscilaciones amplias. En consecuencia, se logra un tiempo de estabilización más corto, aproximadamente del 57% del tiempo con un control clásico PID. Para pilas de combustible de baja potencia, menores a 200W (monocelda), el sistema de presión es prácticamente lineal y con el control PID clásico, se obtienen buenos resultados. Pero para caudales mayores, esto es, para potencias altas, hasta a 2000W (stack), el controlador borroso en conjunción con un control PID, constituye la mejor alternativa.

4.5. Procesadores y procesos

El sistema integral desarrollado para el control de la pila PEM se compone de dos subsistemas básicos, físicamente diferenciados unidos entre sí por un interfaz físico y lógico. En uno de ellos se ubica la electrónica de medida y control compuesta por la carga electrónica y las tarjetas electrónicas de adquisición de datos y actuación. Mientras que en el otro, se agrupan los componentes hidráulicos o fluídicos, que corresponden al suministro de gases y acondicionamiento térmico.

El sistema global para el control de la pila PEM está compuesto de los siguientes subsistemas:

- Procesador Central.
- Procesadores locales (microcontroladores)
- Sistema de Gases.
- Sistema de Refrigeración.
- Carga Electrónica.

Un esquema ilustrativo de la integración de los distintos subsistemas físicos se presenta en la Figura 4.30.

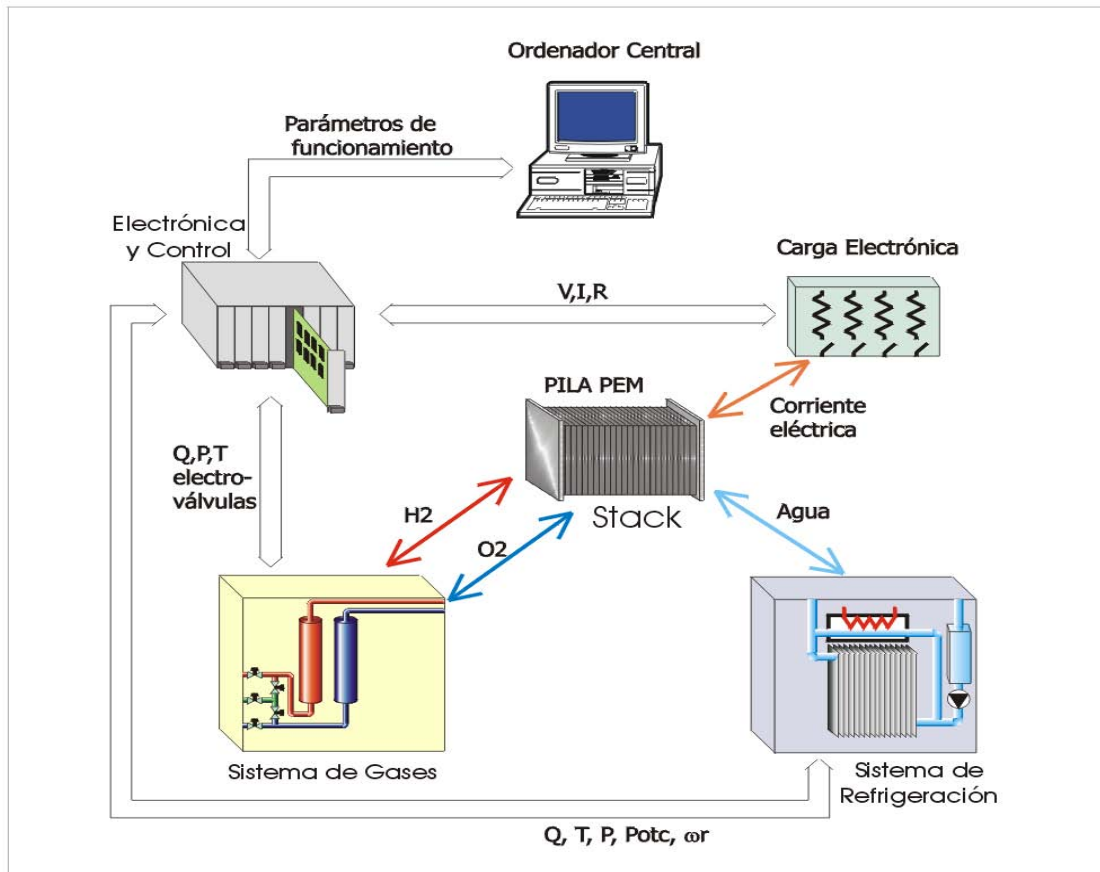


Figura 4.30 Estructura de integración de los subsistemas que componen el sistema de control integral de la pila PEM.

El procesador central, tiene como misión realizar las tareas de: captura y tratamiento de datos, algoritmos de percepción y control del estado de la pila (grado de humectación de la membrana y eficiencia energética) e interfaz de usuario, para definición de parámetros y consignas. En el subsistema *Procesadores locales* (electrónica y control) residen los módulos de adquisición de datos y control de las variables de estado: caudal, presión, temperatura y humedad en el suministro de gases; caudal, temperatura y velocidad de la bomba en la gestión térmica de la pila (potencias medias altas); y voltaje, corriente y resistencia eléctrica en la carga eléctrica variable.

La función principal del subsistema de gases es suministrar a la pila los gases que intervienen en la reacción electroquímica en las condiciones de trabajo: temperatura, humedad, presión y flujo.

Por otra parte, el subsistema de refrigeración debe controlar la temperatura de la pila de combustible mediante el intercambio de calor a través de la recirculación de agua desionizada para potencias altas y ventilación forzada para potencias medias.

Finalmente, el subsistema carga electrónica intercambia los parámetros de voltaje, corriente y resistencia eléctrica con la pila de combustible. Estos parámetros son fundamentales para caracterizar el comportamiento eléctrico de la pila PEM.

4.5.1. Proceso distribuido basado en microprocesadores

La gestión y control automático de las variables de estado, se realiza en una red de microcontroladores (Esclavos) que se comunica a través de un nodo pasarela (Maestro) con el procesador central. En los nodos de esta red se realiza la estabilización y el control de cada una de las variables de estado de la pila: caudal, temperatura, presión, humedad y la acción directa sobre los actuadores, transductores y carga electrónica.

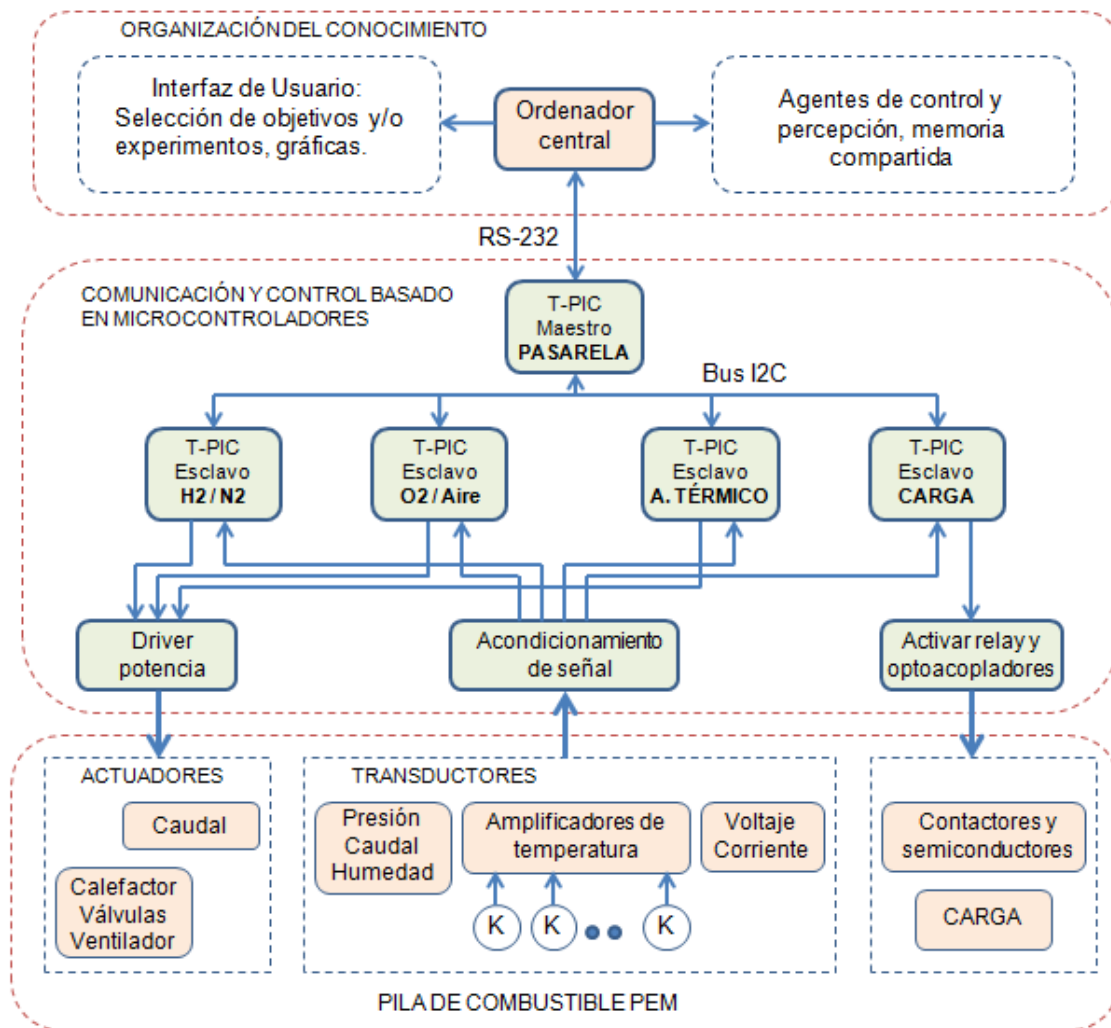


Figura 4.31. Esquema general de la arquitectura hardware diseñada para el control integral de la pila de combustible.

El microcontrolador utilizado para la adquisición, control y transmisión de datos dispone de un convertidor analógico digital (A/D) de 12bits y protocolos de comunicaciones SERIE e I2C. La red de microcontroladores está conectado al ordenador central a través del protocolo de comunicación serie RS-232. Un nodo actúa como pasarela, T-PIC (maestro), gestionando la transmisión de datos de forma bi-direccional entre la red de microcontroladores y el ordenador central. La comunicación o transmisión de datos entre la red de

microcontroladores, nodos T-PIC (esclavos) y el nodo T-PIC (maestro) se realiza a través del protocolo de comunicación I2C.

Los nodos esclavos, realizan de manera autónoma el control del proceso asignado, enviando al ordenador central las variables a monitorizar y los mensajes del estado-alarma, y recibiendo el valor de los puntos de consigna que afecten a dicho proceso. En resumen, el control de las variables de estado es un control distribuido, Figura 4.31. Así, para el sistema de suministro de hidrógeno/combustible a la pila, el nodo T-PIC (esclavo-H₂) se encarga de gestionar los transductores y actuadores correspondientes a esta línea de suministro de gas, de igual forma lo hace el nodo T-PIC (esclavo-O₂) para la línea del oxidante.

▪ **Procesador local para adquisición y control de señales eléctricas.**

El diseño y desarrollo de los nodos de proceso se ha realizado con ORCAD. A fin de obtener versatilidad y robustez en los procesos de comunicación y control de bajo nivel, se ha desarrollado un procesador local de propósito general tanto para la adquisición y tratamiento de las señales de los sensores, como para la comunicación y control de variables en cada proceso. El procesador local (T-PIC) dispone de una gran variedad de entradas y salidas analógicas y digitales. Además, de los protocolos de comunicación para operar como esclavo o maestro, facilitando con ello la incorporación de nuevas variables o parámetros.

La Figura 4.32, muestra el diagrama de bloques del nodo o procesador local de propósito general. Dispone de un bloque con dos protocolos de comunicación, el protocolo serie RS-232 para la transmisión de datos entre procesador central y procesador maestro; y, el protocolo de comunicación I₂C utilizado para la transmisión de datos entre los procesadores esclavos y maestro.

El bloque de entradas, diseñado para el tratamiento de señales digitales y analógicas, que pueden ser seleccionadas a través de micro-switches. Las entradas y salidas digitales se han aislado con dispositivos de aislamiento galvánico para evitar daños al microcontrolador. Además, el bloque de entradas dispone de un convertidor frecuencia-voltaje utilizado para sensores rotatorios (medida de caudal de metanol o agua de refrigeración). Para suministrar un voltaje continuo necesario en los medidores-controladores de flujo másico y activación de los MOSFET's de potencia utilizados en la carga eléctrica, ha sido necesario el diseño del bloque de conversión digital a analógico.

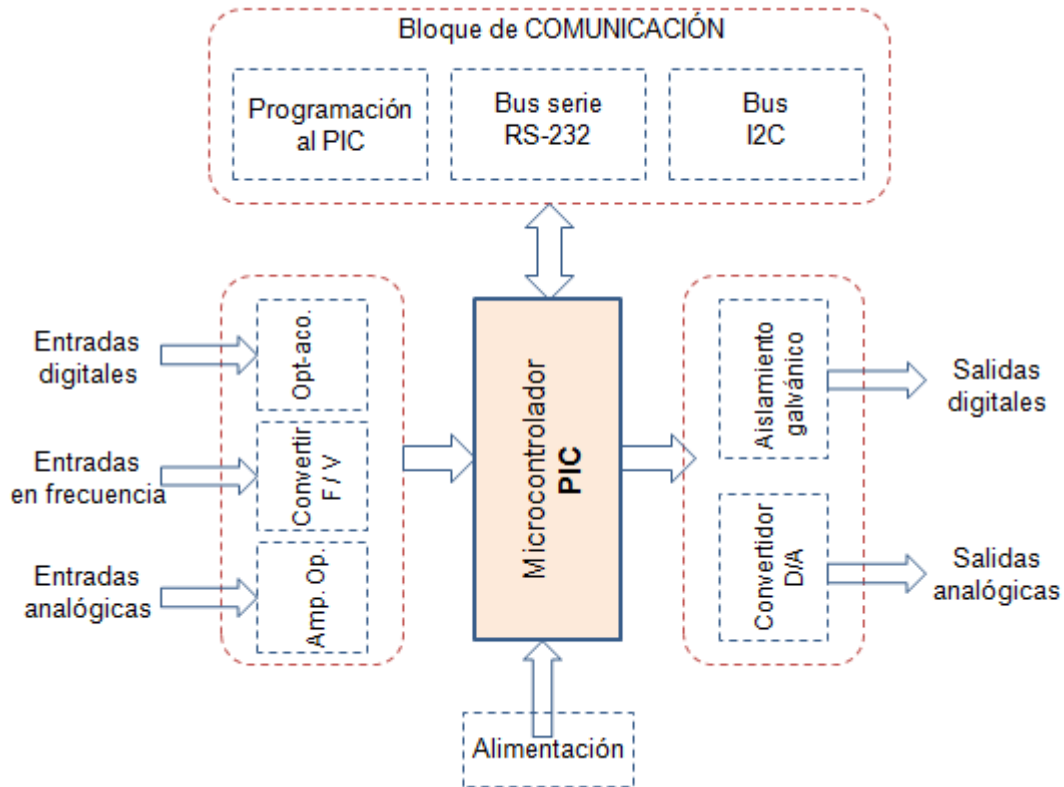


Figura 4.32. Diagrama de bloques de entradas, salidas y comunicaciones del procesador local

La Figura 4.33 presenta la tarjeta base física del nodo de proceso local; al no disponer del conector serie corresponde a un esclavo. Además, ha sido necesaria la integración de otros módulos tanto para la etapa de potencia (actuadores) como para el acondicionamiento de la señal eléctrica de algunos sensores.

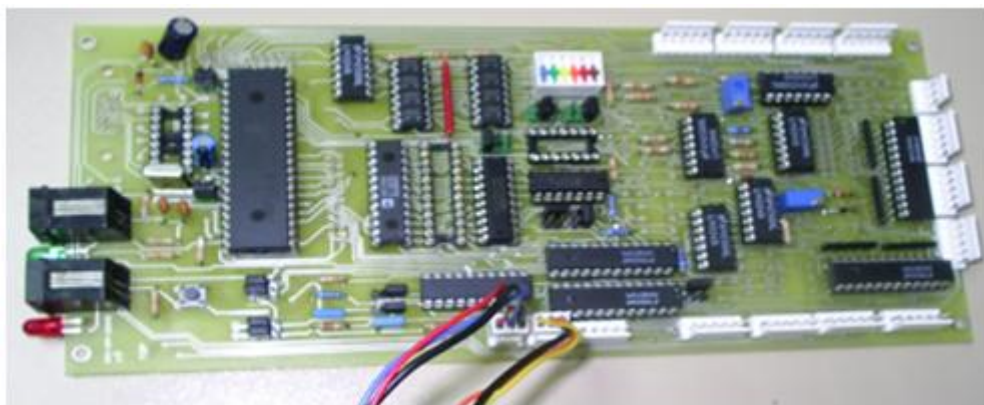


Figura 4.33. Tarjeta universal T-PIC, base física del nodo de control local genérico.

4.5.2. Procesos de comunicación y monitorización

Se ha desarrollado una aplicación software, denominado MONITORIZAR, que reside en el procesador central. Los distintos procesos que se ejecutan desde esta aplicación (**agentes**), se comunican entre sí y con los procesadores de bajo nivel mediante un conjunto de mensajes con una sintaxis predefinida y descrita en el proceso de comunicación y gestión de la comunicación y a través de una memoria local y global compartida.

▪ Comunicación y gestión de la información.

La necesidad de crear una red robusta de microcontroladores inter-comunicados para la realización de tareas de control y supervisión obliga a crear protocolos eficientes de gestión de la información y de las comunicaciones. El nodo maestro se considera como administrador de las comunicaciones entre la red de microprocesadores y el ordenador central. El protocolo de comunicación, visto desde el procesador central, se divide en dos ciclos fundamentales: de lectura y de escritura. Figura 4.34.

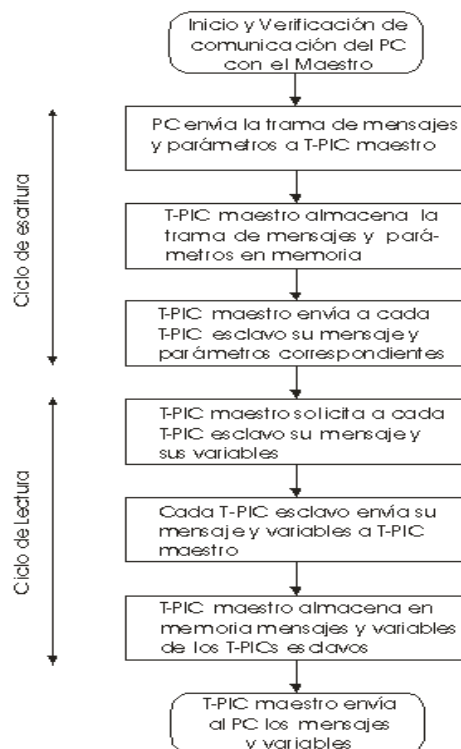


Figura 4.34. Diagrama de flujo del sistema de comunicación.

El bloque de inicio realiza la función de verificar el estado de conexionado y la configuración de los periféricos. El puerto destinado a la manifestación del mensaje de error en el nodo maestro, será común a todos los mensajes de error y servirá para detectar errores. Además, existe una variable error que almacena todos los errores codificados, y es decodificada en el procesador central a fin de conocer el origen del error. Las comprobaciones de comunicación

del nodo maestro con el procesador central se realizan de forma periódica en cada ciclo, a través del protocolo de comunicación RS-232.

En el ciclo de escritura, el procesador envía los mensajes, parámetros y consignas dirigidas a los nodos esclavos a través de la pasarela, nodo maestro. La sincronización del sistema se realiza de manera apriorística teniendo en cuenta la velocidad del puerto serie y la duración de un periodo de ciclo de ejecución. El nodo maestro almacena los datos en una secuencia temporal consecutiva. La razón de no separar la información por subsistemas a la reducida memoria de los microcontroladores. Por tanto, cada una de las partes, el nodo maestro, el procesador central y los nodos esclavos reconocen el número de parámetros correspondientes a cada proceso a controlar. El nodo maestro envía a través del puerto de comunicación I2C una trama de datos con un formato previamente definido, Figura 4.35. Una vez enviado los datos al primer nodo esclavo, el nodo maestro realiza la misma operación con el resto de los nodos esclavos. El paquete de datos lleva un encabezamiento de mensaje, en el cual se encuentra la dirección del nodo esclavo-n, el tipo de acción que puede ser de escritura o lectura y a continuación los datos de referencia de manera secuencial.

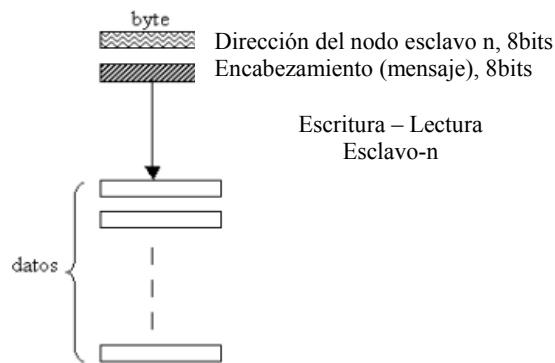


Figura 4.35. Paquete de datos, maestro → esclavo → maestro.

Durante el ciclo de lectura, el maestro solicita a cada esclavo los mensajes y variables a monitorizar mediante la trama de datos, provocando en éste, una interrupción en su proceso de ejecución. Toda la información almacenada en la memoria de datos del nodo maestro, se envía en una sola trama al procesador central. La identificación de uno u otro modo de operación se realiza por medio del *mensaje lectura o escritura* del nodo esclavo, Figura 4.35.

Este tipo de comunicación permite la ejecución independiente de la aplicación software y de los procesadores locales (periféricos) de bajo nivel siempre y cuando sigan el protocolo preestablecido. La *aplicación* ha sido desarrollada en el lenguaje visual LabVIEW y la implementación de los distintos procesos se ha realizado bajo el paradigma maestro-esclavo ya que facilita el modelo de **agentes** propuesto para la organización del conocimiento y control de la pila PEM, que se desarrolla en el Capítulo 6. El nivel de programación en LabVIEW permite conectar los terminales de bloques funcionales mediante cables ficticios por donde fluye toda la información (datos) hasta obtener el resultado deseado. Esto simplifica el desarrollo de una arquitectura de **agentes** con varios algoritmos y la ejecución individual de estos **agentes** sin necesidad de ejecutar toda la aplicación.

Las competencias de la aplicación MONITORIZAR se resumen en los siguientes puntos:

- Establecer la comunicación con la red de nodos de proceso de bajo nivel (microprocesadores).
- Recepción de las señales sensoriales a través del puerto de comunicación serie y preprocesamiento de la información.
- Envío de las referencias de control a la red de nodos de proceso (microprocesadores).
- Interpretación de los mensajes recibidos.
- Registro en memoria compartida de las series temporales de las variables y consignas seleccionadas.
- Realización del ciclo de control para la ejecución de los procesos implicados en el control autónomo de la pila PEM en condiciones estables de humectación, alejado del subespacio de estado de humectación críticos.
- Comunicación entre procesos (agentes) mediante el paso de mensajes.

La aplicación MONITORIZAR consta de una interface con el usuario, donde el OPERADOR puede configurar el tipo de escenario a experimentar (sistema y aplicación concreta) y la monitorización de las variables de estado.

4.6. Control integral de la pila PEM: estación de ensayos

Un esquema de los componentes neumáticos y eléctricos que se han integrado en el sistema de monitorización y control integral desarrollado, se muestran en la Figura 4.36. Se puede observar los controladores utilizados en la regulación de las variables de estado: la gestión del suministro de gases, gestión térmica de la pila y de la carga eléctrica.

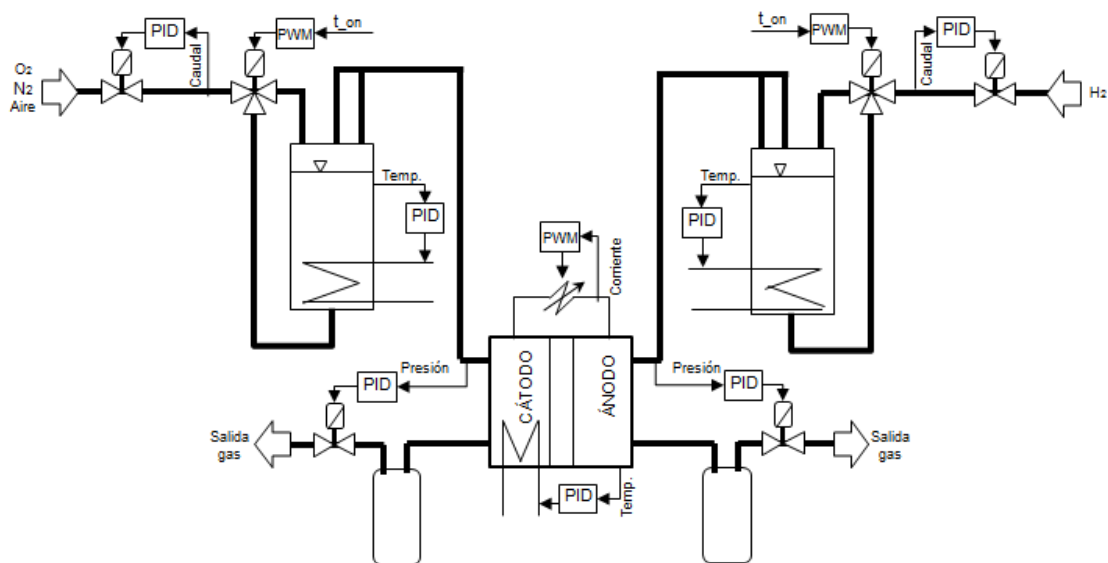


Figura 4.36. Esquema de los componentes neumáticos, de calefacción y de carga integrados en el sistema de control de las variables de estado de la pila.

El prototipo desarrollado se ha integrado en un soporte de aluminio con interconexiones entre los diferentes subsistemas. La gestión de los gases de suministro en cada línea, anódica y catódica, se encuentran separadas para dar mayor seguridad al sistema, evitando con ello la mezcla de gases, ante alguna fuga. En la zona intermedia (separación de las dos líneas de suministro de gases), se encuentran las tarjetas electrónicas de acondicionamiento analógico, control digital y potencia, Figura 4.37.



a)



b)

Figura 4.37. Prototipos compactos del sistema de control integral desarrollados para pilas de combustible poliméricas (PEM): a) potencias bajas. b) potencias medias.

Además de estos prototipos, se ha desarrollado una versión educativa utilizada en las clases del Máster/Doctorado de Energías Renovables, Pilas de combustible y supercondensadores, CSIC-Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Figura 4.38.



Figura 4.38. Prototipo de sistema integral de medición y control de variables de estado de una pila: versión educativa.

Las principales ventajas que presenta este sistema integrado de medición y control de pilas de combustible, en relación a otros sistemas, se detallan a continuación:

- Incorporación de un sistema de carga electrónica que maximiza sus prestaciones.
- Dimensiones reducidas del sistema integrado.
- Integración de una red de procesadores locales (microcontroladores) que garantizan robustez en tareas de comunicación, control y supervisión, con un protocolo eficiente de gestión de la información y las comunicaciones.
- Evita tener proveedores en el exterior, lo que reduce el coste de asesoría técnica ante averías, mantenimiento y/o repuestos.
- Fácil utilización para el usuario final del sistema global.

- Sistema modular, compacto, económico, desarrollado con tecnología Nacional que puede trabajar tanto para pilas PEM de hidrogeno como para pilas de Metanol directo de diferentes tamaños.
- Incorpora válvulas con accionamiento neumático garantizando la seguridad del sistema frente a posibles fallos eléctricos, y fugas o concentración de hidrogeno en el ambiente.
- La regulación de presión se realiza mediante un proceso de medida y control sencillo de bajo coste, eliminando los problemas de condensación de vapor de gas a la salida de la pila, evitando con ello su inundación y la consecuente disminución del rendimiento eléctrico.
- Sistema con una arquitectura de control abierta, flexible ante cambios, como: aumento de variables a controlar e incorporación de nuevos algoritmos de control para conseguir un funcionamiento autónomo de la pila PEM.

En resumen, se dispone de un sistema integral automatizado para el control de la pila PEM, dotado de mecanismos de actuación automática y monitorización de las variables de estado, necesarios para: la generación de conocimiento, como la estimación de los estados críticos de operación de la pila PEM, que se describe en el Capítulo 5 y la generación de un sistema de supervisión y control autónomo para la pila PEM para diferentes tipos de aplicación, Capítulo 6.

CAPÍTULO 5

Percepción de estados críticos de la pila PEM: Inundación y deshidratación

Las zonas críticas de operación de la pila PEM están ligadas, entre otros efectos, a determinados valores de las variables de estado (condiciones de operación), a una demanda variable de potencia de la carga, y de manera directa a la mayor o menor hidratación de la membrana polimérica (MEA), tal y como se analizó en el Capítulo 3. De hecho, la inundación de la pila PEM causa problemas de difusión de los gases reactantes, disminuyendo con ello la corriente máxima que puede generar la pila. Por el contrario, la deshidratación aumenta la resistencia de la membrana, debido a que su conductividad depende de las moléculas de agua que sirven de soporte al transporte de protones [Natarajan D., 2005].

5.1. Análisis preliminar

5.1.1. Fallos en pilas PEM

La alta eficiencia y respuesta eléctrica de la pila de combustible PEM depende en gran parte del estado de su electrolito, membrana de intercambio protónico (generalmente Nafion). Es

imprescindible que la membrana conserve un cierto grado de humedad para que presente buenas características de operación tanto mecánicas como eléctricas, lo que limita la temperatura de trabajo a valores cercanos a los 80°C. De hecho, es la membrana polimérica quién fija el límite superior de temperatura de funcionamiento de la pila PEM.

▪ **Incidencias por deshidratación de la membrana**

Sin una adecuada humidificación de las membranas durante su funcionamiento en la pila PEM, no puede ocurrir *la conducción iónica*, y de producirse sería con una eficiencia reducida, y en consecuencia con un bajo rendimiento eléctrico. Esto es, los iones producidos en el electrodo del ánodo deben consumirse en el electrodo del cátodo, y de igual manera los electrones producidos en el electrodo del cátodo deben consumirse en el electrodo del ánodo. Para mantener el balance de carga, estos iones y electrones se desplazan desde la localización donde se generan a la región donde se consumen. En el caso de los electrones, el proceso de transporte es relativamente fácil ya que los electrones son capaces de fluir desde un electrodo al otro, a través de una conexión externa. No obstante, para los iones, el transporte es más difícil, y en este caso la membrana polimérica se utiliza como medio de transporte en el flujo de los iones. La eficiencia de este proceso es menor comparado con el proceso de transporte de los electrones. Una forma de combatir este efecto es mantener húmeda la membrana mientras la pila está en funcionamiento, pues esto facilita que los iones de hidrógeno puedan moverse a través de las moléculas de agua, durante la reacción de intercambio protónico, aumentando así la conductividad iónica de la membrana. En otras palabras, la des-hidratación de la membrana de intercambio protónico es proporcional a la *resistencia iónica* de la misma e inversamente proporcional a su conductividad iónica.

▪ **Incidencias por inundación de la membrana.**

En un sistema electroquímico que genera electricidad, todas las reacciones electroquímicas que se producen generan, al menos, un subproducto. Las pilas de combustible PEM no están exentas de ello, y la reacción electroquímica del hidrógeno y oxígeno presentes en la pila, genera agua. Si este subproducto no se evacua, desde el interior de la misma hacia el exterior, puede llegar a generar una estrangulación en la zona de reacción electroquímica de la pila PEM, impidiendo que los nuevos flujos, tanto de combustible como de oxidante, puedan reaccionar electroquímicamente. Este problema aumenta en las pilas PEM, pues una inundación en la región del electrodo da lugar a fenómenos locales de escasez de combustible, que produce una caída en la tensión de salida de la pila de combustible y que incluso pueden afectar al tiempo de vida de la misma. Por ello, la gestión eficiente del subproducto agua, en la membrana constituye un reto en el área de las pilas de combustible PEM.

Los estados críticos de operación de la pila de combustible PEM han sido estudiados, de forma individual, por varios investigadores, en pequeñas celdas. De hecho, el problema de evitar la inundación y la deshidratación a la vez, se menciona en [Natarajan D., 2005], donde se muestra como ambos estados de operación deterioran significativamente la respuesta eléctrica de la pila de combustible. En [Kordesch K. and Simader G., 1996], se analiza la influencia del contenido de agua en la conductividad de la membrana de Nafion. Una

membrana seca o semi-seca posee una baja conductividad en el transporte de protones (iones), por lo que durante su funcionamiento puede llegar incluso a agujerearse y provocar un cortocircuito químico en la pila PEM, generando mezclas locales de los gases. Los efectos causados por la desecación de la membrana de Nafion en una pila PEM se recojen en el trabajo de M. Marrony [Marrony M. 2008], donde se pone de manifiesto que la sequedad de la membrana afecta a su durabilidad. Bajos rendimientos en la respuesta eléctrica de una pila de combustible PEM debido a la conductividad de la membrana de Nafion se muestran en [Wahdane B. 2007], donde se manifiesta que una apropiada hidratación de estas membranas es crítica para mantener su conductividad. Por otra parte, los fenómenos locales de falta de combustible provocados por la inundación de agua en la zona de reacción electroquímica de la pila de combustible, se describen en [O'Hayre, 2001], [Akira Taniguchi, 2008].

5.1.2. Técnicas de detección de estado

Para estimar las zonas críticas de operación de la pila PEM, se requieren técnicas de inspección e instrumentación dedicada, como la presentada por Fang-Bor Weng en [Fang-Bor Wang, 2008], con técnicas de Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC) y diagramas de Nyquist, para estudiar el grado de humidificación de la membrana de Nafion y los efectos producidos en una pila PEM. En el Capítulo 3 de esta memoria, se presentó el modelo de una pila PEM operando en modo simétrico para diferentes temperaturas, que implican diferentes grados de humedad de la membrana [Hombrados A.J.G^a, 2005], utilizando Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC). La detección del estado de funcionamiento de la pila, en condiciones críticas de operación, con inundación o baja estequiometría del aire, en el stack, se presenta en el trabajo [Ramschak E. 2006]. Para ello se superpone a la corriente una señal de baja amplitud y frecuencia específica, analizando la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia (análisis de la distorsión total del armónico, THDA). Esta técnica permite determinar el mal funcionamiento de la pila, pero no las causas que lo originan.

El diagnóstico de la deshidratación de la membrana, la inundación de la pila de combustible y el envenenamiento del catalizador en el ánodo, a causa del monóxido de carbono en una celda, lo describe Kadyk Thomas [Kadyk T. 2009]. Utiliza el análisis no lineal de la función de segundo orden de la respuesta de frecuencia (NFRA), ya que la Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIC) no es capaz de separar los tres estados analizados. Por otro lado, Kevin R. Minard en [Kevin R. 2006], utiliza imágenes de resonancia magnética (MRI) para visualizar el contenido de agua (deshidratación e inundación) en una pila de combustible polimérica durante su funcionamiento. Las imágenes obtenidas se correlacionan con la corriente de salida y con las características de operación de la pila, para obtener una interpretación de los fenómenos subyacentes. En [Rubio M.A., 2010] se propone una metodología para la caracterización de la inundación en el cátodo, sequedad de la membrana y envenenamiento por monóxido de carbono en el catalizador del ánodo de una pila de combustible polimérica. Plantean un modelo analítico de funcionamiento de una pila de combustible polimérica con bajo coste computacional (modelo de circuito equivalente), para analizar las condiciones de inundación y sequedad de la pila, y una validación a partir de las

variaciones detectadas en el espectro de impedancia, tras la simulación, para verificar la bondad del modelo.

5.1.3. Limitaciones en las técnicas actuales

Las técnicas y/o métodos propuestos para el diagnóstico de fallos, deshidratación e inundación de la membrana, y envenenamiento de la misma en las pilas PEM, sección 5.1.2, incluyen, por una parte, equipos como: analizadores de Espectros de Impedancia Compleja (EIC), imágenes de resonancia magnética (MRI) o análisis de la distorsión total de armónicos (THDA), que aumentan drásticamente el coste y la complejidad de los sistemas de monitorización y control para pilas PEM, lo que limita el uso en aplicaciones de las pilas PEM, donde se necesitan sesiones de operación continua y desatendida, durante largos períodos de tiempo.

Esto sugiere una investigación de nuevos modelos y métodos de ensayo y caracterización de las pilas PEM, que no requieran una instrumentación compleja y costosa, y que a su vez permitan integrar sistemas para la percepción y control del estado de pilas PEM. Esto posibilita la determinación en tiempo real de los estados críticos, no deseables, por su incidencia negativa en el rendimiento eléctrico de la pila PEM.

Como alternativa a los métodos analíticos ya utilizados, se propone un modelo de razonamiento aproximado para la detección de estados tanto *críticos* como *normales* de operación de la pila PEM, como son la deshidratación e inundación de la membrana. Este modelo aprovecha la tolerancia en imprecisión para codificar la información relevante mediante términos lingüísticos que conllevan una relación aproximada con los datos cuantitativos. Para ello se propone en primer término un método de estimulación y posterior análisis de la respuesta eléctrica de la pila, para su caracterización. El análisis de la respuesta eléctrica, permite extraer parámetros relevantes para la clasificación del estado de la pila. Para la clasificación de estado se propone un modelo de árbol de decisión borroso para ejecución en tiempo real.

Previo al desarrollo de un sistema de percepción de estado es necesario establecer una etapa de adquisición de conocimiento del experto sobre el dominio de aplicación. Con este fin, se propone una metodología de perturbaciones y caracterización de la pila PEM, que se detalla en el siguiente apartado.

5.2. Caracterización de estado

Antes de abordar la caracterización de estados, mediante métodos de perturbación y caracterización, es conveniente analizar los siguientes aspectos:

- Disponer de técnicas de caracterización e instrumentación apropiada para que los resultados sean viables y fiables, y se logre la mejor identificación de los estados mientras el sistema está en operación y controlado.
- Diseñar y realizar experimentos o protocolos para extraer la información relevante para la identificación y caracterización de cada estado.
- Elección del método de perturbación de la pila, así como, su amplitud y duración en el tiempo para no influenciar el estado a caracterizar.
- Selección del periodo de muestreo y registro de los datos experimentales.

Siguiendo estas consideraciones, se ha procedido a diseñar y ejecutar un plan de experimentación o metodología de ensayos haciendo uso de técnicas de caracterización “*in situ*”, tanto para la caracterización de la respuesta eléctrica de la pila PEM como para la determinación del estímulo a aplicar. El plan de experimentación para el desarrollo y validación de la técnica de detección de estados críticos y normal de operación de la pila PEM, se ha realizado con dos monoceldas con ensamblaje electrodos-membrana, descritas en el Capítulo 3.

Para el control del caudal, temperatura, humedad y presión de los gases de alimentación, resistencia eléctrica entre cátodo y ánodo, así como para medir la evolución temporal de las variables eléctricas corriente y voltaje generada por la pila PEM, se ha utilizado el sistema integral de control de las variables de estado descrito en el Capítulo 4.

5.2.1. Selección de estados: críticos y normal

En el apartado 5.1.1. “Fallos en pilas PEM”, de este Capítulo, se comentaron los efectos negativos en la respuesta eléctrica de la pila producidos por incidencias tales como la inundación y la deshidratación de la membrana. La primera causa problemas de difusión en los gases reactantes, disminuyendo por tanto la corriente máxima de la pila. La segunda incidencia aumenta la resistencia eléctrica de la pila, ya que la conductividad requiere las moléculas de agua para el transporte de protones.

Estas incidencias están relacionadas, a su vez, de forma directa con determinados valores de las variables: suministro de los gases reactantes, temperatura de la pila y carga a alimentar. Esto es, existen unas condiciones de operación que conducen a la pila PEM a subespacios no deseables del espacio de estados. De hecho, las prestaciones eléctricas de la pila de combustible bajo ciertas condiciones de operación pueden verse alteradas de manera tanto positiva como negativa. Así, se obtienen comportamientos positivos (zonas óptimas) en la respuesta eléctrica, asociados a estados denominados normales, que muestran:

- Potencia máxima.
- Máxima eficiencia.

Sin embargo, comportamientos negativos (zonas críticas), inundación y deshidratación, en la respuesta eléctrica de la pila se traducen en:

- Bajo rendimiento eléctrico.
- Baja eficiencia en el uso de los combustibles.
- Inestabilidad en la respuesta eléctrica.

Estos últimos, son subespacios de pre-crisis que deben evitarse para evitar deterioros en la pila. Para el control autónomo de la pila PEM se han elegido tres estados: NORMAL, SECO e INUNDADO. El primero para tener un punto de partida en el cual la pila de combustible opera de manera estable, y los dos últimos por corresponder a zonas críticas donde la pila puede sufrir daños irreversibles, de ahí el interés en mantener siempre a la pila operando alejada de las zonas críticas, lo que redundaría en una buena respuesta eléctrica. La diferencia básica entre estos tres estados se encuentra en el contenido de agua en la membrana de la pila. La resistencia de la membrana se ve afectada por los valores de las variables de estado: caudal, presión, humedad, y temperatura, y da lugar a desplazamientos de la curva V-i, modelo experimental de representación global del comportamiento eléctrico de la pila.

Así, el estado, denominado “NORMAL” de operación de la pila PEM está descrito por el comportamiento de su respuesta eléctrica cuando la pila opera en condiciones estándares de operación. En este estado la curva V-i presenta el perfil mostrado en la Figura 5.1.I.c, donde los problemas debido a la resistencia de la membrana y difusión a altas corrientes son bajos. Sin embargo, si la pila se encuentra en el estado “SECO”, se observan desviaciones agudas del sobrepotencial de la zona ohmica, observándose una respuesta similar a la expuesta en la Figura 5.1.I.a.

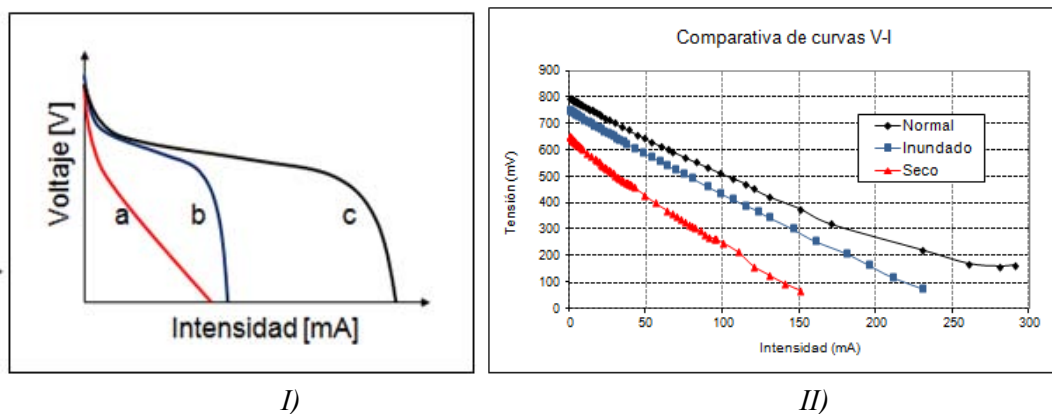


Figura 5.1. Curva V-i para los tres estados de operación de la pila PEM en función de los niveles de humedad de la membrana: I) Teórica, II) Experimental

Finalmente, los problemas de difusión a altas corrientes se ven más potenciados cuando la pila se encuentra en el estado “INUNDADO”, con lo cual la curva V-i muestra un comportamiento similar al presentado en la Figura 5.1.I.b, [O’Hayre, 2006]. La Figura 5.1.II, ilustra tres curvas V-i reales correspondientes a los tres estados de operación de la pila PEM: SECO – curva roja, NORMAL – curva negra e INUNDADO – curva azul.

Tabla 5.1. Condiciones de operación de la pila en tres estados

| Estado de operación | Caudal ánodo [ml/min.] | Caudal cátodo [ml/min.] | Temp. [°C] Humectador | Temp. Pila [°C] | %Humedad Relativa |
|---------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|
| Seco | 100 | 150 | Ambiente | Ambiente | 40 |
| Normal | 100 | 130 | 30 | Ambiente | 100 |
| Inundado | 10 | 10 | 50 | Ambiente | 100 |

Las condiciones de operación para cada uno de los tres estados se muestran en la Tabla 5.1. Las condiciones estándares de operación fijadas en [O'Hayre, 2006], determinan el estado NORMAL, mientras que las condiciones de los estados SECO e INUNDADO han sido provocadas, para llevar a la pila a operar con alto y bajo contenido de agua en la membrana. Se han realizado numerosos ensayos variando alternativamente caudal, humectación o temperatura, manteniendo fijas el resto de las variables. En el caso de la humectación, se observó la respuesta tanto al no humectar los gases, como al humectarlos con diferentes períodos. En el caso de los caudales, se reduce el caudal desde el valor inicial de 150 ml/min hasta 10 ml/min.

Los ensayos se han realizado a presión atmosférica y temperatura ambiente.

5.2.2. Técnicas de perturbación

En este apartado se describe la metodología utilizada para caracterizar los estados críticos de la pila: *Seco* e *Inundado*, y también el estado *Normal* de operación de la pila, a través de su respuesta eléctrica, cuando ésta se somete a cambios de tipo escalón en las variables de estado de entrada: caudal, temperatura humectador, tiempo de humectación de los gases reactantes y carga eléctrica. El cambio en el valor de estas variables, se lleva a cabo con el sistema integral de medición y control de las variables de estado, [Agila W. 2003], [Agila W. 2005], [Guinea D.M., 2008], descrito en el Capítulo 4, (Ref. Patente [Agila W. 2007]). El criterio de cambio en las variables de operación de la pila, medida y análisis de respuesta eléctrica, está fijado por las técnicas de caracterización in situ descritas en el apartado 2.2.3 del Capítulo 2.

La experimentación realizada con estas técnicas proporciona una base estadística para describir la dinámica de la respuesta eléctrica de la pila en una determinada zona de trabajo y bajo unas condiciones de operación prefijadas. El plan de experimentación o metodología consiste en aplicar a la pila de combustible PEM diferentes tipos de perturbaciones o estímulos, y analizar su respuesta eléctrica, tensión e intensidad, en el tiempo.

Los estímulos propuestos para caracterizar los tres estados de operación de la pila PEM, son:

- Salto de carga [ΔI].
- Salto de caudal [ΔQ].
- Frecuencia de oscilación de intensidad [$f\Delta I$].

La curva de polarización V-I de una pila PEM, constituye el punto de partida para la implementación tanto de los estímulos a aplicar a la pila como de las técnicas a utilizar. Proporciona una visión global del comportamiento eléctrico de la pila PEM, voltaje e intensidad, en todos los puntos de operación. De esta curva característica, se extraen dos puntos relevantes:

- Intensidad de cortocircuito I_{cc} , obtenida cuando el voltaje es aproximadamente cero.
- El perfil de la curva V-i compuesto por las tres regiones de sobre-potenciales.

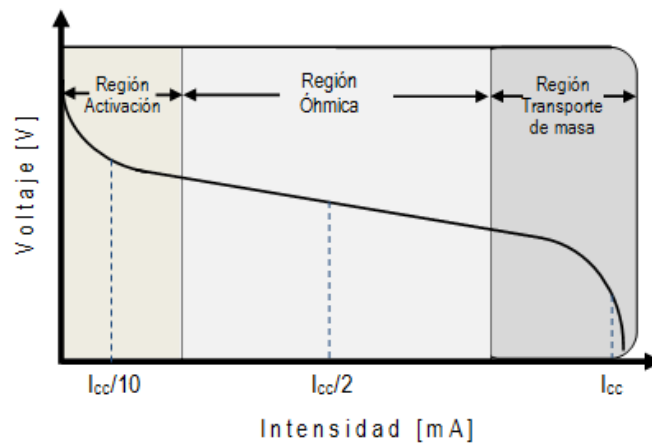


Figura 5.2. Representación gráfica de los tres puntos característicos de la curva de polarización donde se aplican las perturbaciones.

Los estímulos aplicados a la pila PEM durante su operación se han realizado en tres puntos característicos de la curva V-i:

- Corriente de cortocircuito [I_{cc}], en la zona de difusión; el segundo punto corresponde
- Mitad de la corriente de cortocircuito [$I_{cc}/2$], situado en la zona de pérdidas óhmicas
- Decima parte de la corriente de cortocircuito [$I_{cc}/10$], localizado en la zona de activación.

La ubicación de estos tres puntos a lo largo de las diferentes zonas de sobre-potencial predominante en la pila PEM, Figura 5.2, permiten obtener un mejor conocimiento del funcionamiento de la misma.

▪ Salto de CARGA [ΔI].

En la sección 2.2.4, se indica que la respuesta inmediata a la aplicación de un salto de carga en una pila de combustible PEM, representa la resistencia de la membrana [R_m], que está relacionada con el grado de humedad de la membrana, MEA [Andreas B., 2004]. El test realizado consiste en cambiar de manera repentina el valor prefijado del punto de intensidad media demandado a la pila PEM. Los valores de intensidad media en los que se aplican los estímulos de salto de carga, son: I_{cc} , $I_{cc}/2$, $I_{cc}/10$, Figura 5.2. El valor de salto de carga aplicado al valor de intensidad media corresponde a un Delta Intensidad [ΔI] de 40mA,

aproximadamente el 20% de la corriente de cortocircuito. Este valor permite obtener resultados apreciables.

Ante este cambio repentino de carga, se observa una variación en el tiempo de la variable, no fijada, tensión de la pila, que se asocia al estado de humedad de la membrana de la pila PEM. La variación de la tensión suele ser más rápida en estados de poca humedad que en los de alta humedad. La Figura 5.3 muestra la respuesta esperada de la evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados *Seco* e *Inundado*, ante una perturbación de aumento de carga (ΔI).

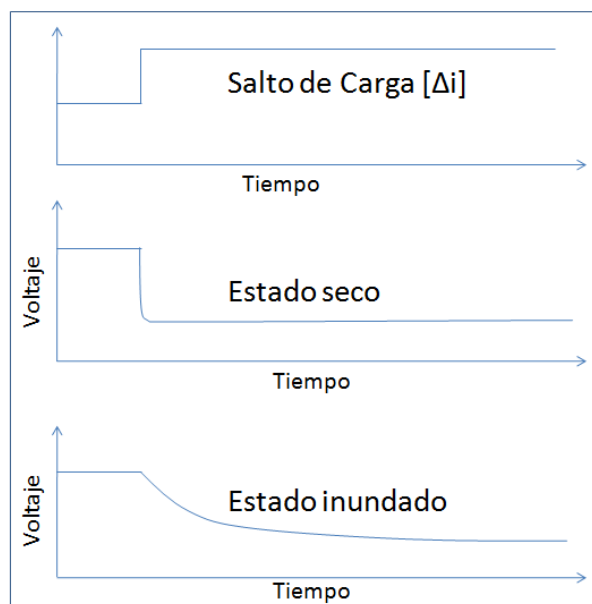


Figura 5.3. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados *Seco* e *Inundado*, ante un aumento de carga.

- **Salto de CAUDAL [ΔQ].**

En este caso, la perturbación se selecciona atendiendo a las consideraciones de la técnica de interrupción de intensidad, que consiste en cambiar de manera súbita el valor prefijado del caudal catódico. El salto de caudal corresponde a un Delta Caudal [ΔQ] cuyo valor mantiene una relación directa con el caudal prefijado (*caudal de referencia*), en el instante de aplicar el estímulo, Eq. (5.1).

$$\Delta Q = 2 \cdot x \cdot Q_{Ref} \quad (5.1)$$

Donde: Q_{Ref} es el caudal de referencia y, x un factor que toma valores de 1 y 2, y que representa el doble o cuádruple del caudal de referencia. Se ha experimentado con $x=1$ al haber obtenido variaciones apreciables.

Los valores de intensidad media aplicados a la pila PEM durante el estímulo de salto de caudal, corresponden a los tres puntos característicos de la curva V-I, que se encuentran distribuidos en las tres zonas de sobrepotencial, Figura 5.2.

La evolución de la respuesta, tensión, suele ser positiva ante un aumento de caudal, si la pila se encuentra inundada. Esto se refleja en un aumento de la tensión generada por la pila PEM, ya que el exceso de caudal tiende a arrastrar el agua generada en la reacción electroquímica.

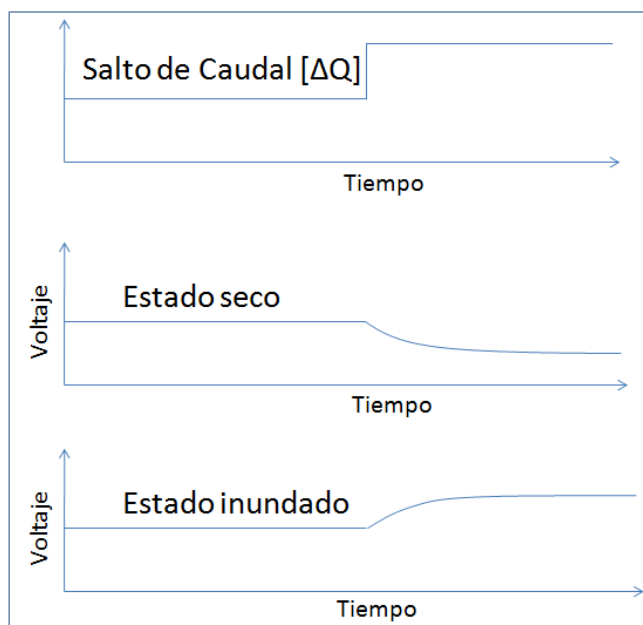


Figura 5.4. Evolución temporal esperada de la tensión generada por la pila PEM en los estados Seco e Inundado, ante un salto de caudal (aumento).

Sin embargo, si la pila se encuentra en estado Seco, las prestaciones eléctricas disminuyen, debido a que el exceso de caudal tiende a secar la pila, esto es, a deshidratar la membrana. La Figura 5.4, muestra la evolución en el tiempo del voltaje generado por la pila PEM en condiciones de inundación y deshidratación ante un aumento de caudal.

- **Frecuencia de oscilación de INTENSIDAD $[f\Delta I]$.**

En este caso la perturbación aplicada es una carga de intensidad variable (sinusoidal) en el tiempo. La carga aplicada tiene un valor de intensidad media, al que se superpone un valor de intensidad senoidal de baja amplitud y alta frecuencia (6mV y 4kHz respectivamente), con la carga electrónica incorporada en la estación integral para el ensayo de pilas de combustible (Ref. Patente [Agila W. 2007]). Los valores de demanda de intensidad media corresponden a los tres puntos característicos de la curva V-I, Figura 5.2.

Ante esta demanda de variación de intensidad $[f\Delta I]$, se analiza la evolución en el tiempo de la amplitud de la oscilación de la variable no fijada (tensión, $[\Delta V]$) de la pila PEM.

Si la pila PEM se encuentra en el estado Seco, la impedancia $[\bar{Z}]$ aumenta debido al incremento de la resistencia de la membrana, y con ello aumenta la amplitud de oscilación de la tensión generada por la pila, $[\Delta V]$, cuando se encuentra ante una demanda de intensidad, Eq. (5.2).

$$\Delta V = \left| Z \right| f \Delta I \quad (5.2)$$

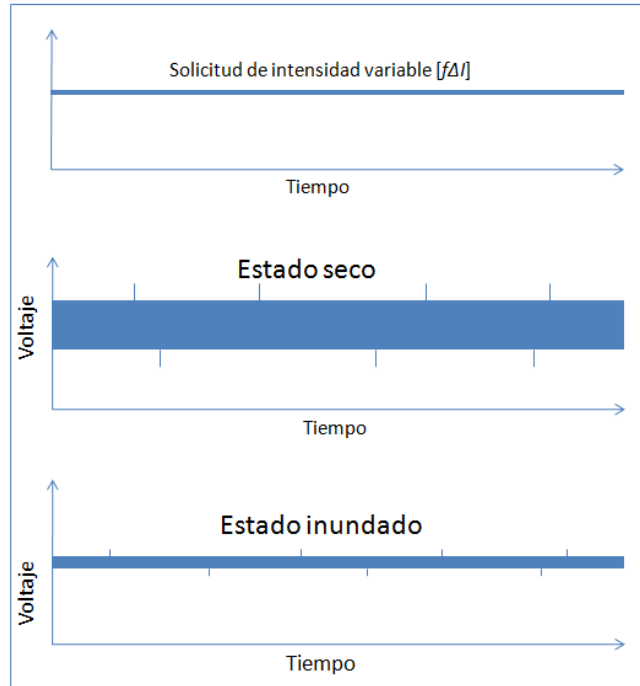


Figura 5.5. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados Seco e Inundado, ante la perturbación variación de intensidad.

Esto se traduce en una respuesta rápida de la tensión generada, que debido a la rapidez de demanda de carga, se aproximará al estado final antes de producirse un nuevo cambio en la demanda de intensidad. Sin embargo, si la pila se encuentra inundada, su impedancia es baja, y la respuesta es lenta y apenas variará el voltaje cuando se produzca un nuevo cambio de demanda de intensidad, por lo que la amplitud de oscilación de la señal de voltaje es baja. La evolución en el tiempo de la amplitud del voltaje generado por la pila PEM en condiciones de inundación y deshidratación, ante una misma demanda de frecuencia de oscilación de la intensidad, se presenta en la Figura 5.5.

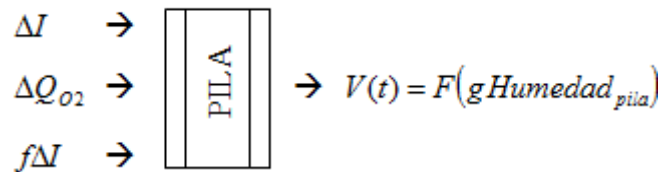


Figura 5.6. Perturbaciones aplicadas a la pila PEM para la extracción de características de su respuesta temporal.

En resumen, se ha analizado la respuesta de voltaje generada $[V(t)]$, en función del grado de humedad de la membrana de la pila de combustible PEM, ante tres tipos de perturbaciones: Salto de carga $[\Delta I]$, Salto de caudal en cátodo $[\Delta Q_{O_2}]$ y Frecuencia de oscilación de intensidad $[f \Delta I]$, Figura 5.6.

5.2.3. Extracción de características

Este apartado presenta el análisis de la respuesta eléctrica de la pila PEM ante las perturbaciones de salto de carga, salto de caudal y frecuencia de oscilación de intensidad. El análisis de la *evolución temporal de la tensión* generada por la pila de combustible, se realiza con el objetivo de extraer de la misma las características que posean mayor capacidad de discriminación entre los estados de la pila seleccionados. Los valores de estas características deben ser similares para distintos casos de un mismo estado, y diferentes ante casos correspondientes a distintos estados. Estas características, obtenidas experimentalmente, se utilizarán para determinar el estado de operación de la pila de combustible PEM.

▪ Análisis del voltaje ante una perturbación de salto de CARGA.

La velocidad de respuesta eléctrica de la pila PEM ante un cambio de carga depende del grado de humedad de la membrana; a mayor sequedad mayor es la velocidad de respuesta. Para validar esta hipótesis, se ha buscado una característica que permita diferenciar los tres estados de operación de la pila PEM.

La representación gráfica de la evolución temporal (65.000 muestras consecutivas) de la tensión generada por la pila de combustible PEM en los tres estados de operación y bajo el mismo salto de carga, se muestra en la Figura 5.7a. El incremento es $[(I_{cc}/10) + \Delta i]$, y la expectativa una caída de la tensión. Además, se observa que la disminución en la tensión es mayor en el estado Inundado que en los otros dos estados. Por otra parte, analizando los resultados obtenidos con una disminución de carga $[(I_{cc}) - \Delta i]$, Figura 5.7b, se puede observar un incremento en la tensión generada por la pila, también esperable. Este incremento en la tensión es mayor en el estado Seco que en los otros dos estados.

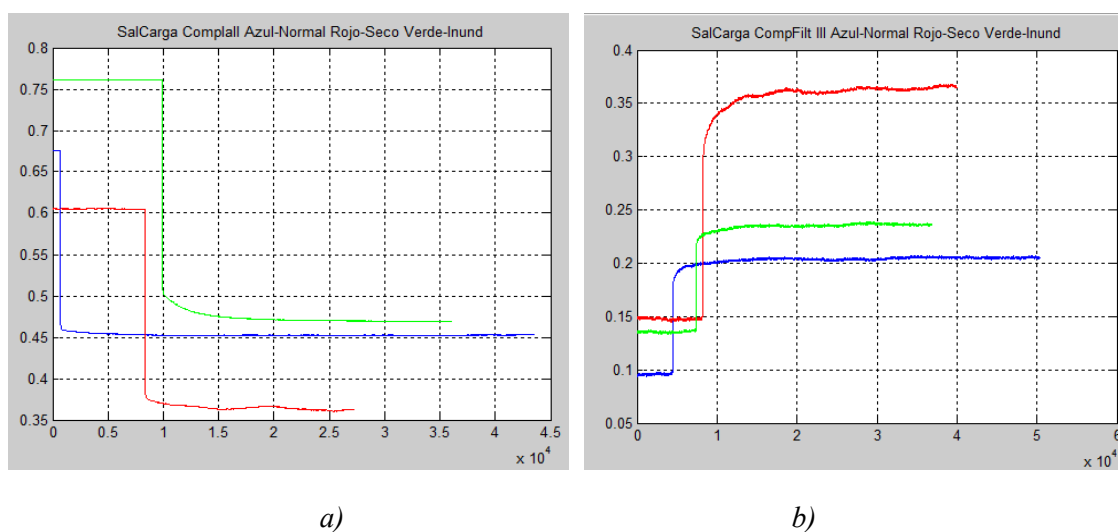


Figura 5.7. Evolución temporal de la tensión de la pila PEM en tres estados de operación ante: a) aumento de carga $[+ \Delta i]$; b) disminución de carga $[- \Delta i]$.

Los resultados experimentales corroboran las expectativas de los modelos teóricos, mostrando que los valores finales de las tensiones (estado estable después del salto de carga) se deben más a los valores de carga aplicados, que al propio estado de la pila. Por ello, se propone analizar la evolución del voltaje generado una vez normalizado, *voltaje normalizado*. Esto permite comparar con mayor facilidad la evolución temporal del cambio de voltaje para distintos niveles del salto de carga, tanto para incrementos como para decrementos.

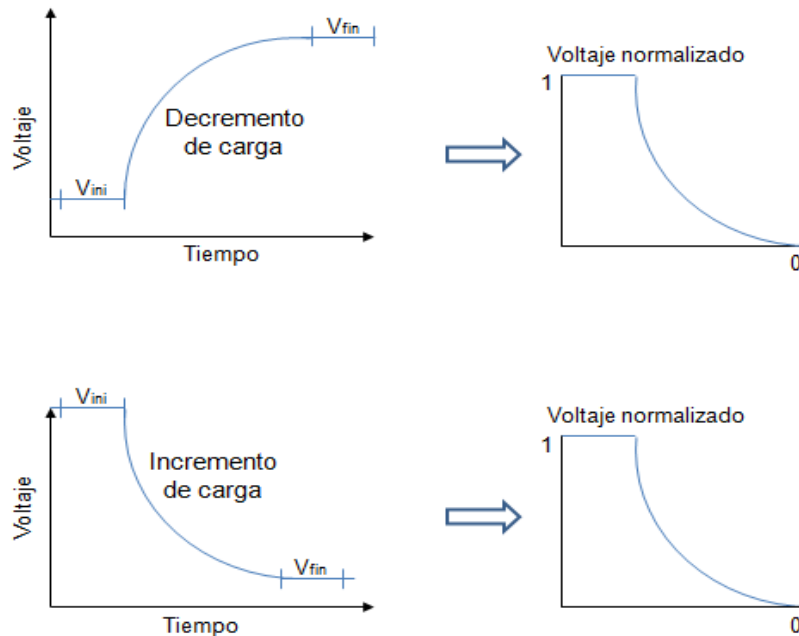


Figura 5.8. Proceso de normalización de la tensión generada por la pila PEM ante un decremento e incremento de carga.

Al voltaje inicial, le corresponde un voltaje normalizado de uno, y final de cero. Para el resto de los valores, el voltaje normalizado varía linealmente con el voltaje medido, Eq. 5.3, Figura 5.8.

$$v(t) = \frac{V(t) - V_{fin}}{V_{ini} - V_{fin}} \quad (5.3)$$

Donde: $v(t)$ es el voltaje normalizado en el instante t , $V(t)$ es el voltaje real medido en el instante t , V_{ini} el voltaje inicial promediado a un número determinado de muestras, y V_{fin} es el voltaje final promediado. El voltaje final promediado se ha calculado sobre 15.000 muestras, aproximadamente 6s, con el objetivo de obtener una buena estabilización del experimento.

En la Figura 5.9 se muestra la tensión normalizada para los tres estados de operación de la pila PEM: Seco (rojo), Normal (azul) e Inundado (verde).

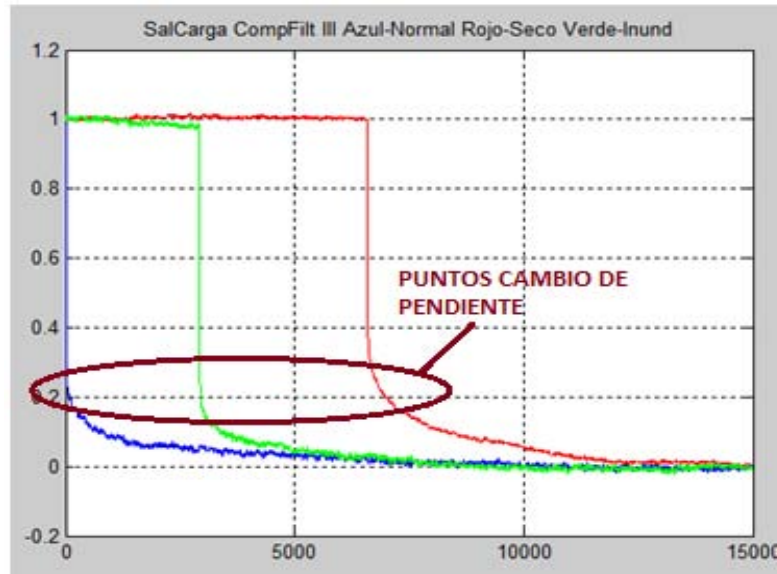


Figura 5.9 Tensión normalizada para los tres estados de operación de la pila ante un mismo salto de carga.

Se analizan los puntos de cambio de pendiente en la caída de la tensión normalizada para los tres estados de operación, por su evidente poder de discriminación entre los tres estados. El significado físico de este parámetro, cambio de pendiente ante salto de carga, corresponde a la respuesta eléctrica instantánea de la pila de combustible PEM. Indica la sensibilidad de la pila ante un cambio de carga y está relacionada de manera directa con el contenido de agua en la membrana. Así, la evolución temporal de la tensión normalizada en el estado Seco debe presentar una mayor rapidez de reacción ante un cambio de carga, que en el caso del estado Inundado. Sin embargo, la reacción de la tensión en el estado Normal (azul), aparece en el intervalo comprendido entre el estado Seco (rojo) e Inundado (verde).

El proceso que se ha utilizado para la detección de la característica punto de cambio de pendiente, es el siguiente:

- a) *Almacenamiento de datos*, se inicia el registro de datos, un intervalo Δt antes del inicio de la perturbación Salto de Carga. Los datos son almacenados durante seis segundos, tiempo suficiente para que se establezca la respuesta de la pila.
- b) *Detección del salto de carga*, se procede a encontrar el punto donde se realiza el Salto de Carga.
- c) *Normalización del voltaje*, el punto de salto permite realizar el proceso de normalización de la tensión generada por la pila de combustible, Eq. (5.3).
- d) *Punto cambio de pendiente*, en los datos correspondientes a la tensión normalizada se busca el punto de cambio de pendiente más pronunciado.

En la Tabla 5.2 se presentan algunos de los valores del punto de cambio de pendiente, y el valor de la tensión normalizada, para los tres estados de operación de la pila PEM.

Tabla 5.2. Valores de punto de cambio de pendiente de la tensión normalizada para tres estados.

| ESTADOS | Valores de punto cambio de PENDIENTE | | | | | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| SECO | 0,478502 | 0,503138 | 0,475266 | 0,445559 | 0,489541 | 0,444275 | 0,463414 | 0,452463 | 0,470245 |
| NORMAL | 0,343289 | 0,368075 | 0,319422 | 0,343422 | 0,33552 | 0,378032 | 0,351052 | 0,340712 | 0,312103 |
| INUNDADO | 0,270482 | 0,287165 | 0,244467 | 0,235843 | 0,285251 | 0,277272 | 0,231534 | 0,243902 | 0,227821 |

▪ **Análisis del voltaje ante una perturbación de salto de CAUDAL.**

En la Figura 5.10 se muestra la evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM ante un cambio brusco de caudal, tanto en aumento como en disminución. Así, se observa que ante un aumento de caudal disminuye ligeramente la señal de voltaje generada por la pila PEM, causada por la deshidratación de la membrana. La deshidratación aumenta la resistencia de la membrana, dando lugar a una mayor caída de la tensión en la respuesta eléctrica de la pila; mientras que, al aplicar consecutivamente una disminución de caudal el voltaje generado vuelve a recuperarse, indicando con ello que la pila vuelve a su estado inicial de operación.

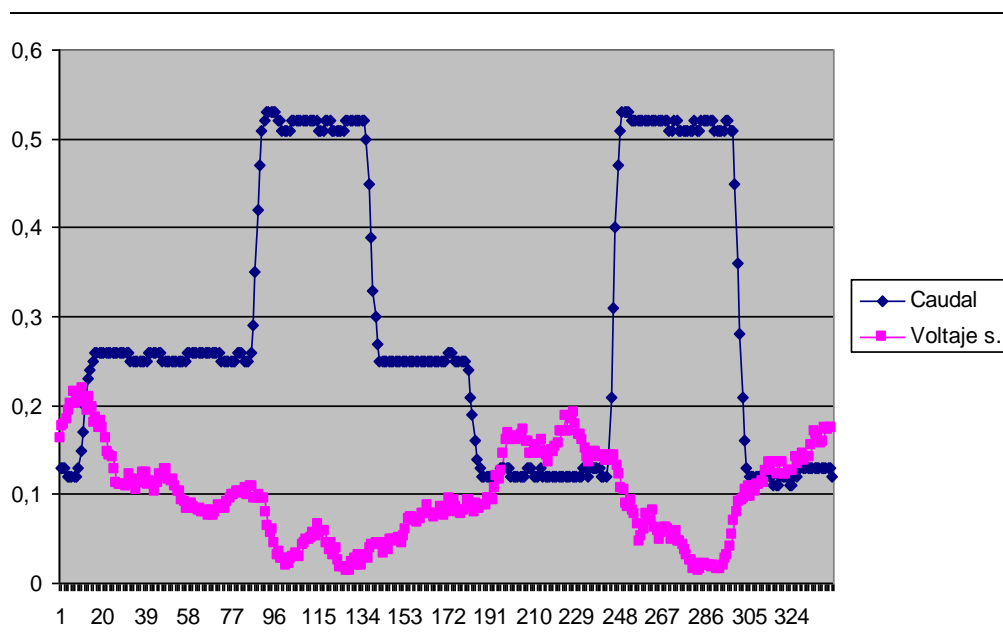


Figura 5.10. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM ante cambios del caudal oxidante.

Si se analiza la evolución temporal del voltaje generado por la pila PEM en los estados, Seco, Inundado y Normal ante un mismo Salto de Caudal, aumento, los resultados confirman de nuevo las expectativas de los modelos teóricos, esto es, ante aumentos de caudal, si, la pila PEM se encuentra en el estado, Figura 5.11.:

- *Seco*, el voltaje generado evidencia una clara tendencia descendente.
- *Inundado*, el voltaje generado por la misma presenta un aumento.

- *Normal*, se observa una ligera disminución en la evolución temporal del voltaje, pero mucho menor que en el estado Seco.

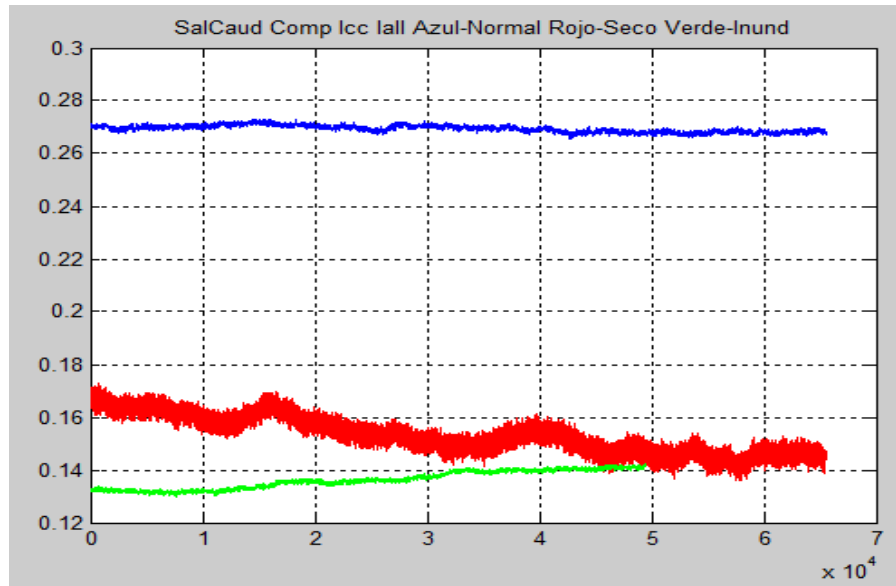


Figura 5.11. Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados Normal (azul), Seco (rojo), Inundado (verde) ante un aumento de caudal.

Estos resultados evidencian patrones distintos en la evolución temporal, que permiten extraer características diferenciadoras en tiempo real de los tres estados de operación de la pila PEM analizados: la diferencia entre el *voltaje final* y el *voltaje inicial*, delta voltaje [ΔV], Figura 5.12.

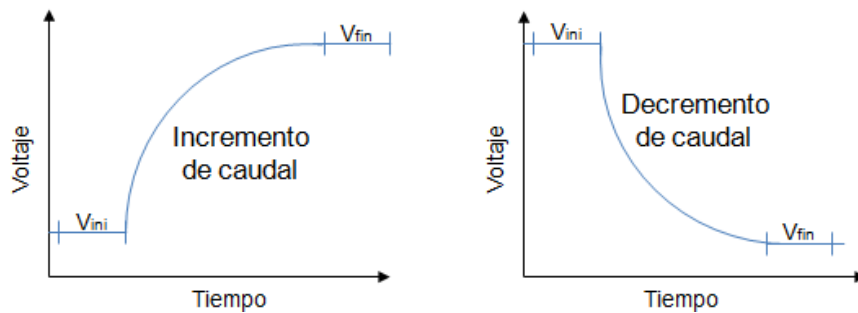


Figura 5.12. Variación del voltaje de salida de la pila ante salto de caudal, incremento y decremento respectivamente.

Sin embargo, hay que tener presente que esta diferencia de voltaje, cambia de signo si se produce un aumento o una disminución del salto de caudal. Por tanto, se formula una corrección de signo en función de la variación del estímulo, Eq. (5.4).

$$\Delta V = \frac{V_{fin} - V_{ini}}{f} \quad (5.4)$$

Donde: ΔV es la característica de discriminación de estados seleccionada, V_{fin} y V_{ini} son los voltajes final e inicial, promediados a un determinado número de muestras; 60.000 en este

caso (45s) para estabilizar la respuesta, y f es el factor corrector, positivo/negativo ante aumentos/disminuciones de caudal.

El significado físico de este parámetro (ΔV) es directo, esto es, el cambio de voltaje ante un cambio de caudal, y su valor varía en función del contenido de agua en la membrana.

Algunos de los valores obtenidos para la diferencia de tensión, ΔV , ante un cambio de caudal, se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Valores de la diferencia de tensión “DELTA Voltaje” ante un cambio de caudal en el cátodo, para los tres estados.

| ESTADOS | Valores de Delta Voltaje [ΔV] | | | | | | | | |
|----------|---|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| SECO | -0,01305 | -0,015539 | -0,00986 | -0,01852 | -0,0209 | -0,01397 | -0,02167 | -0,02499 | -0,02012 |
| NORMAL | -0,003313 | -0,004402 | -0,000217 | -0,007011 | -0,00145 | -0,00094 | -0,00713 | -0,00124 | -0,00238 |
| INUNDADO | 0,009479 | 0,000233 | 0,004450 | 0,010513 | 0,001807 | 0,005875 | 0,012240 | 0,002713 | 0,005987 |

▪ **Análisis del voltaje ante una perturbación de frecuencia de oscilación de INTENSIDAD.**

En la Figura 5.13 se muestra uno de los resultados de la evolución temporal del voltaje generado por la pila, en cada uno de los estados analizados, Normal (azul), Seco (rojo), Inundado (verde) ante la misma perturbación de frecuencia de oscilación de la demanda de intensidad respecto a un valor medio. En este caso, la característica que diferencia a los tres estados de operación de la pila PEM, es la amplitud de la oscilación que muestra la señal de voltaje de salida de la pila. Así, a mayor grado de humedad menor amplitud de oscilación y viceversa.

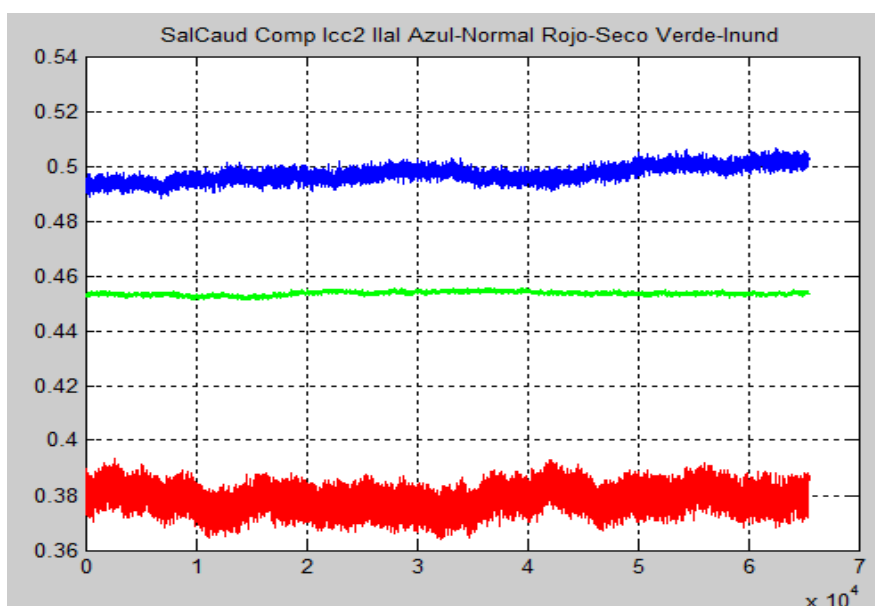


Figura 5.13 Respuesta temporal de la tensión generada por la pila PEM en los estados de operación: Seco (roja), Normal (azul), Inundado (verde), ante una perturbación de frecuencia de oscilación de intensidad.

Se han realizado experimentos con diferentes niveles de demanda de intensidad media y en los diferentes estados de operación de la pila PEM. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de esta perturbación, confirman la hipótesis mencionada en la sección 5.2.2., y muestran una característica clara para diferenciar los estados de operación críticos y normal de la pila PEM.

Así pues, una característica relevante para diferenciar los tres estados es la amplitud de oscilación de la señal de voltaje generado por la pila PEM en el tiempo, ante el estímulo de oscilación de la señal de intensidad respecto a la intensidad media.

La amplitud de esta oscilación, se determina mediante la desviación típica de la evolución temporal del voltaje $[\sigma_v]$, Eq. (5.5).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [V(i) - \bar{V}]^2}{N}} \quad (5.5)$$

Donde: N es el número total de muestras, y \bar{V} es el voltaje medio del total de muestras, Eq. (5.6).

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N V(i)}{N} \quad (5.6)$$

Sin embargo, durante la experimentación la evolución media del voltaje no se mantiene constante, y varía ligeramente en función del caudal. Por tanto, se propone como característica discriminatoria entre estados, la *desviación típica móvil* $[\sigma'_v]$, o la desviación típica de la señal de voltaje por fracciones con igual número de muestras, n , donde $[n < N]$. Posteriormente, se calcula la media de todas estas desviaciones típicas por fracciones, o amplitud de oscilación del voltaje, Eq. (5.7).

$$\sigma'_v = \frac{\sum_{i=1}^{N-n} \sigma_v(i)}{N-n} \quad (5.7)$$

Algunos de los valores de la desviación típica móvil calculados para los tres estados de operación de la pila PEM, se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Valores de la desviación típica móvil en los tres estados de operación de la pila PEM ante la perturbación frecuencia de oscilación de intensidad.

| ESTADOS | Valores de la desviación típica móvil para los tres estados | | | | | | | | |
|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| SECO | 0,004635 | 0,004185 | 0,004533 | 0,003459 | 0,005182 | 0,005442 | 0,003691 | 0,005076 | 0,004879 |
| NORMAL | 0,002507 | 0,002441 | 0,00235 | 0,002496 | 0,002819 | 0,00243 | 0,00271 | 0,00269 | 0,00273 |
| INUNDADO | 0,000404 | 0,000388 | 0,000337 | 0,000526 | 0,000474 | 0,000385 | 0,000419 | 0,000332 | 0,000446 |

A continuación, se analiza el poder de discriminación entre estados de cada una de las tres características, para un conjunto de casos. En la Figura 5.14, se muestra la buena separación entre estados conseguida con la característica amplitud de oscilación de voltaje, $[\sigma'_v]$.

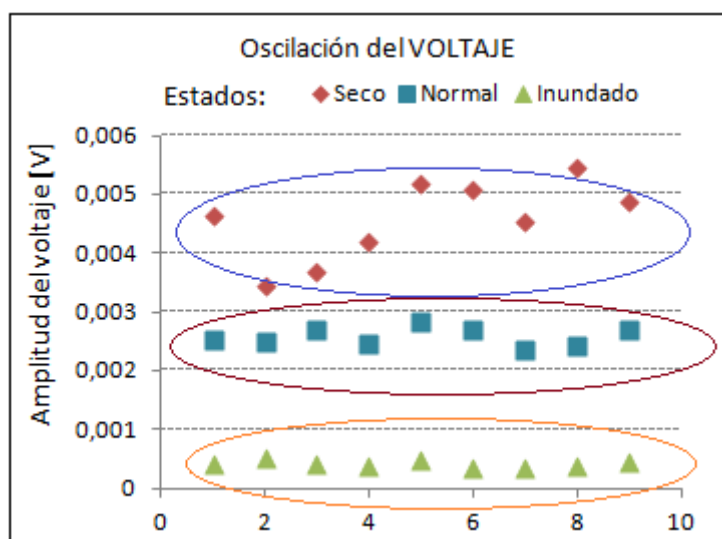


Figura 5.14. Distribución de los valores de amplitud de oscilación de voltaje en los tres estados de operación de la pila PEM.

El estado *Seco* (rombos) presenta mayores valores de amplitud de oscilación de voltaje. El estado *Inundado* (triángulos), menores y los del estado *Normal* (cuadrados), se sitúan entre los estados *Seco* e *Inundado*. Los resultados confirman la hipótesis de que, el valor de la impedancia de la membrana es alto cuando se encuentra seca y bajo cuando está inundada.

Los valores del parámetro punto de cambio de pendiente $[\Delta P]$, calculado después de un Salto de Carga, se representan en la Figura 5.15, y también muestra una capacidad alta para separar los tres estados. Esto es, el estado *Seco* (rombos) es el que presenta valores superiores del punto de cambio de pendiente de la curva normalizada. Por el contrario, el estado *Inundado* (triángulos), presenta valores inferiores. Mientras que, en el estado *Normal* (cuadrados) el valor del punto de cambio de pendiente, se sitúa entre los valores de los estados *Seco* e *Inundado*. Esto confirma la hipótesis de que, el valor instantáneo en el voltaje generado por la pila PEM después de un salto repentino de carga se corresponde con la resistencia de la membrana, cuyo valor depende del grado de humedad.

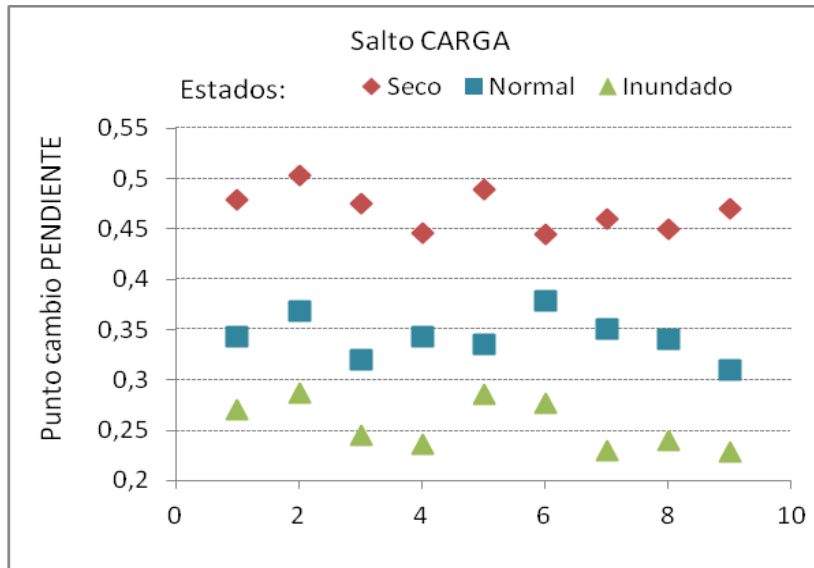


Figura 5.15. Distribución de los valores del punto de cambio de pendiente para los tres estados de operación de la pila PEM.

La Figura 5.16, muestra los valores del parámetro delta voltaje $[\Delta V]$ ante un salto de caudal, para los tres estados. Esta característica también presenta una alta capacidad de discriminación entre los tres estados de operación de la pila PEM analizados. El estado *Inundado* (triángulos), se presenta siempre en la zona positiva del eje. En este estado se comprueba que a medida que se incrementa el valor del salto de caudal mejoran las prestaciones de la pila PEM, y la diferencia de tensión ΔV aumenta, lo que permite distinguir con claridad que la pila se encuentra inundada.

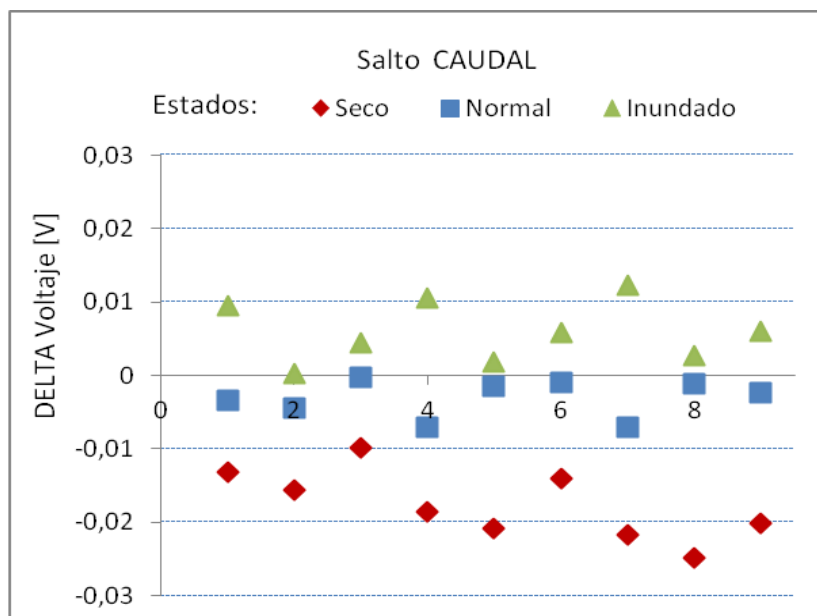


Figura 5.16. Distribución de los valores del parámetro delta voltaje en los tres estados de operación analizados.

Los valores obtenidos en el estado *Seco* (rombos), se encuentran siempre en la zona de valores negativos. Por otro lado, a medida que se incrementa el valor del salto de caudal empeoran las prestaciones eléctricas de la pila, por lo que la diferencia de tensión ΔV incrementa en valor absoluto en la zona negativa, indicando que la pila está en el estado *Seco*. Finalmente, al analizar el estado *Normal* (cuadrados), se observa que los valores ΔV se ubican en la zona negativa, entre los valores del estado *Inundado* y *Seco*.

En todos los casos los resultados experimentales validan las expectativas derivadas de los modelos teóricos. Se obtiene el mismo patrón de distribución tanto para amplitudes de oscilación de voltaje, punto cambio de pendiente como diferencia de tensión, para diferentes demandas de intensidad media, por lo que, se puede utilizar cualquiera de los tres puntos I_{cc} , $I_{cc}/2$ e $I_{cc}/10$ de la curva V-I. Para el control autónomo de la pila PEM se opta por el punto $I_{cc}/2$ de la curva de polarización V-I, ya que se encuentra en la zona óhmica, donde la resistencia de la membrana tiene mayor presencia.

5.3. Modelo de clasificación de estados

Una vez realizado el análisis temporal de las tendencias y de la capacidad de discriminación entre estados de la pila, de las tres características relevantes, extraídas de la señal de voltaje ante perturbaciones, se plantean los problemas asociados a una adecuada clasificación automática de estados. Por un lado, la incertidumbre de los datos experimentales inherente a los sistemas sensoriales y de control y, por otro el solapamiento que se evidencia entre algunos de los agrupamientos que definen los tres estados, Figura 5.17. Esto ha conducido a la propuesta de un modelo de razonamiento aproximado, basado en heurísticos con estructura de árbol de decisión borroso, para la percepción del estado de la pila, que permite interrelacionar las características seleccionadas para lograr una detección de estado más precisa.

5.3.1. Aproximaciones analíticas

Desde las primeras investigaciones realizadas en el campo de las pilas de combustible poliméricas, se han utilizado modelos analíticos teóricos para mejorar tanto los diseños de los distintos componentes de las pilas como de los materiales, a fin de aumentar su eficiencia energética, fiabilidad y durabilidad.

Los modelos analíticos plasman en un conjunto de ecuaciones los fundamentos físicos relacionados con el comportamiento electroquímico de las pilas de combustible PEM; y muchos de estos modelos presentan ecuaciones analíticas simples que incluyen algunos aspectos empíricos. Actualmente, los modelos simples utilizados en las pilas de combustible, emplean parámetros empíricos e hipótesis de partida para reducir la complejidad de los

modelos analíticos. Estos modelos matemáticos simples explican el comportamiento eléctrico de la pila de combustible mediante ecuaciones sencillas que incluyen el voltaje termodinámico y algunas pérdidas de sobrepotencial presentes en su operación [Larminie, J.E, 2000]. En el trabajo [Berger C. 1968] se presenta un modelado de pilas de combustible poliméricas en el que se resumen los principales aspectos teóricos y experimentales.

De hecho, con un modelo analítico se podría predecir el comportamiento estacionario y dinámico de la pila de combustible, en un intervalo de potencia, si se consigue determinar los parámetros del modelo. Desafortunadamente, las pilas de combustible son sistemas muy complejos y difíciles de modelar analíticamente, en su totalidad. Por lo que, muchas de estas predicciones presentan un alto grado de incertidumbre, al incorporar muchas hipótesis iniciales. Por otro lado, las pilas de combustible son sistemas altamente no lineales, y las variables que intervienen pueden tener un nivel bajo de precisión, lo que dificulta la implementación de estos modelos en sistemas de tiempo real, para tareas de detección y control de estado. Estas limitaciones, han conducido a la propuesta de modelos cualitativos más tolerantes con la incertidumbre y el conocimiento incompleto, para el modelado de la pila de combustible y la toma de decisiones de control.

5.3.2. Aproximaciones heurísticas

La palabra heurística aparece en más de una categoría gramatical. Cuando se usa como sustantivo, identifica el arte o la ciencia del descubrimiento, y si aparece como adjetivo, se refiere a cosas más concretas, como estrategias heurísticas, reglas heurísticas o silogismos y conclusiones heurísticas. Claro está que estos dos usos están íntimamente relacionados ya que la heurística usualmente propone estrategias que guían el descubrimiento.

En psicología la heurística se relaciona con la creatividad y se ha propuesto que sea aquella regla sencilla y eficiente para orientar la toma de decisiones y explicar como las personas llegan a un juicio o solucionan un problema. Usualmente una heurística opera cuando un problema es complejo o presenta información incompleta. En general, una heurística puede considerarse como un atajo a los procesos mentales activos y, por lo tanto, es una medida que ahorra o conserva recursos mentales. En ingeniería, una heurística es un método basado en la experiencia que puede utilizarse como ayuda para resolver problemas de diseño. Mediante el uso de heurísticas, es posible resolver más rápido problemas conocidos o similares a otros ya resueltos.

El sentido con el que se usa en este trabajo el término heurística, se encuentra entre la concepción utilizada en Psicología y la de Ingeniería, pues posee un aspecto psicológico al contar con el conocimiento del experto, y la perspectiva de la ingeniería de obtener soluciones a problemas objetivo. En este caso se trata de encontrar soluciones exportables, basadas en la experiencia del experto y el conocimiento adquirido de la experimentación, que permitan estimar el estado de operación de la pila de combustible.

5.3.3. Representación de características mediante conjuntos borrosos

En el pensamiento científico tradicional la comprensión de un fenómeno depende de la capacidad de analizarlo en términos cuantitativos precisos. Sin embargo, los esquemas de razonamiento humano sugieren mecanismos de inferencia aproximados, tanto para la génesis de conceptos, como para el establecimiento de las relaciones entre ellos, esto es, las reglas. De hecho, el cerebro aprovecha la tolerancia en precisión para codificar la información relevante mediante términos lingüísticos que conllevan una relación aproximada con los datos cuantitativos, asociándolos a percepciones y generando acciones [J. M. de la Cruz, 2006]. En este marco, Zadeh presenta las bases iniciales de la teoría de conjuntos borrosos [Zadeh, L.A. 1965], aplicándose a áreas tan variadas como son: el control automático, la optimización, la *clasificación*, y el reconocimiento de patrones, entre otros.

En este dominio se propone un árbol de decisión que maneja valores lingüísticos para la toma de decisiones, con un modelo formal suficiente de organización priorizada del conocimiento, sencillo, intuitivo y fácil de estructurar. Al mismo tiempo, es necesario considerar, que los datos de entrada al sistema, características relevantes, se han obtenido a partir de la perturbación del estado de la pila y caracterización de la señal de voltaje generada, por lo que incluyen un componente de ruido. En estos casos es recomendable el modelado de los datos mediante conjuntos borrosos [Janikow, C.Z. 1998].

Las características seleccionadas en la sección 5.2.3, se han modelado con valores lingüísticos (conjuntos borrosos), definidos mediante funciones trapezoidales, con solapamiento distinto de cero, Figura 5.17. En este caso la transición de un valor a otro es gradual y recoge la incertidumbre y la gradualidad de los sistemas reales. Así, a determinados valores de las características (medidas numéricas) se les asigna dos conjuntos borrosos, pero con distinto grado de pertenencia [Ronald R., 1994] [García-Alegre, M.C. 1991].

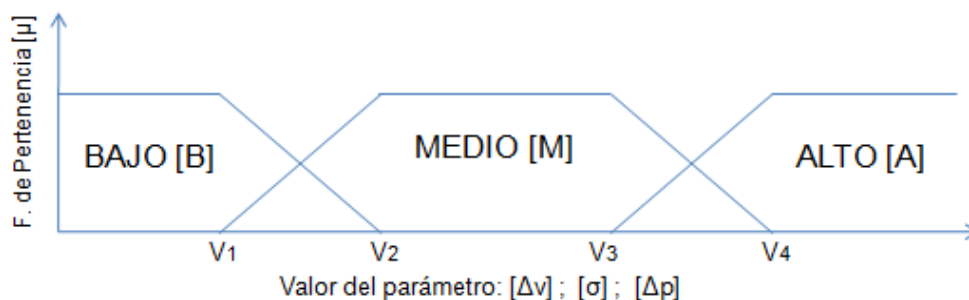


Figura 5.17. Representación mediante conjuntos borrosos de los valores de las características seleccionadas: ΔV , σ'_v y ΔP

Cada una de las características seleccionadas ΔV , σ'_v y ΔP se definen mediante tres términos lingüísticos (conjuntos borrosos), $\{ALTO, MEDIO, BAJO\}$, con cierto solapamiento entre los conjuntos borrosos para garantizar la gradualidad en el paso de uno a otro conjunto y la posible pertenencia a dos conjuntos, pero con distinto grado.

Las funciones de pertenencia de las etiquetas lingüísticas $\{ALTO, MEDIO, BAJO\}$, correspondientes a las tres características, tienen el mismo perfil y número de valores

(conjuntos borrosos} Figura 5.17, pero distintos valores numéricos de los parámetros que definen la función trapezoidal: V1, V2, V3 y V4. Los valores de estos cuatro parámetros se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Valores de los parámetros para cada conjunto borroso de cada una de las tres características $[\Delta V, \sigma'_v, \text{ y } \Delta P]$.

| Característica | Conjunto borroso | V1 | V2 | V3 | V4 |
|--|------------------|--------|--------|--------|--------|
| Oscilación Voltaje [σ'_v] | ALTO [A] | 0,003 | 0,0031 | 0,0055 | 0,006 |
| | MEDIO [M] | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,0031 |
| | BAJO [B] | -0,001 | 0,0 | 0,001 | 0,002 |
| Cambio Pendiente [ΔP] | ALTO [A] | 0,39 | 0,40 | 0,50 | 0,55 |
| | MEDIO [M] | 0,29 | 0,30 | 0,39 | 0,40 |
| | BAJO [B] | 0,10 | 0,20 | 0,29 | 0,30 |
| Delta voltaje [ΔV] | ALTO [A] | -0,001 | 0,00 | 0,02 | 0,30 |
| | MEDIO [M] | -0,01 | -0,007 | -0,001 | 0,0 |
| | BAJO [B] | -0,05 | -0,04 | -0,01 | -0,007 |

Los valores mostrados en la Tabla 5.5, se han obtenido asignando valores a las etiquetas lingüísticas de las características amplitud de oscilación de voltaje, cambio de pendiente y diferencia de voltaje, según las Figuras 5.14, 5.15 y 5.16, respectivamente.

Se han realizado múltiples sesiones de experimentación llevando a la pila de combustible PEM a tres estados de operación definidos inicialmente: *Seco*, *Normal* e *Inundado*, con el objetivo de ajustar los límites de las etiquetas borrosas {BAJO, MEDIO, ALTO} correspondientes a cada una de las características seleccionadas, y validar los métodos de obtención de los parámetros correspondientes para cada característica seleccionada ΔV , σ'_v , y ΔP . Los estados críticos *Seco* e *Inundado* se forzaron experimentalmente.

En la Figura 5.18 a), se observa la reproducibilidad de los resultados de la característica *amplitud de oscilación de voltaje* en los tres estados de operación de la pila PEM. Aunque en el estado *Inundado* se aprecian diferencias significativas entre diferentes sesiones de experimentación, esta diferencia se debe a que se parte de unas condiciones iniciales ligeramente diferentes del contenido de agua en la membrana. Se confirma que la reproducibilidad es suficiente para poder discernir adecuadamente el estado con esta característica, pues no hay solapamiento entre las tres clases (estados). En la Figura 5.18 b), se muestran los resultados, para distintas sesiones de experimentación, correspondientes al parámetro punto *cambio de Pendiente*, ante una perturbación de Salto de Carga. Esta característica también muestra tres agrupamientos de casos, sin solapamiento entre los mismos. Por ello constituye un buen descriptor para la discriminación entre los estados de operación de la pila analizados.

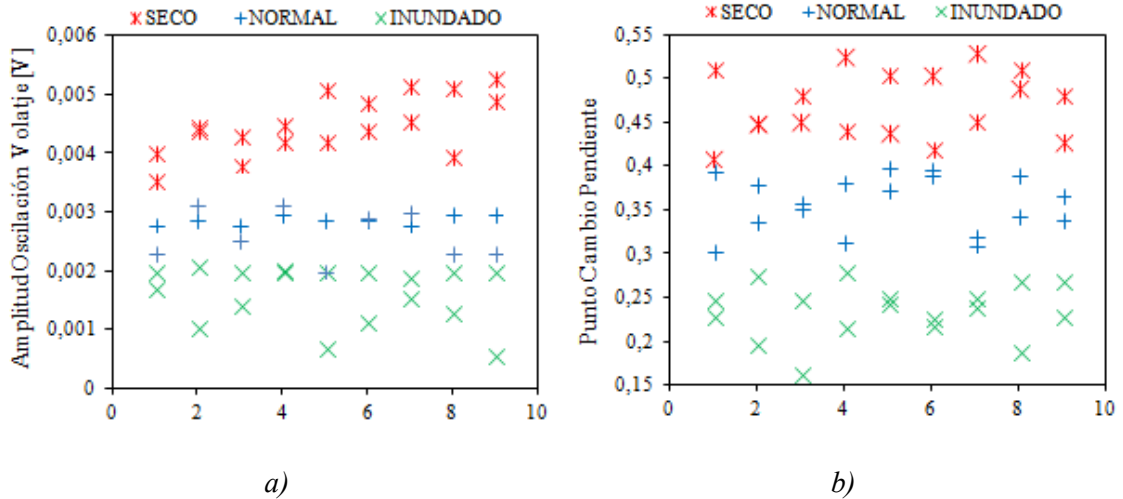


Figura 5.18. Valores de la Amplitud de oscilación de voltaje y del punto Cambio de pendiente en diferentes experimentos para tres estados de operación de la pila PEM: Seco, Normal e Inundado.

A continuación se modelan las dependencias y prioridades entre los valores de estas características, con un sistema de razonamiento cualitativo soportado por un árbol de decisión borroso, como técnica de clasificación adecuada para la detección del estado de operación de la pila PEM en función del valor de cada una de las características seleccionadas: $[\Delta V, \sigma'_v, y \Delta P]$.

5.3.4. Clasificación mediante árbol de decisión borroso

Dentro del área del aprendizaje automático, se encuentran los árboles de decisión caracterizados por su capacidad de dividir un proceso complejo de toma de decisiones, en una secuencia de decisiones simples encadenadas, que proporcionan un esquema de razonamiento fácil de interpretar [Mitra, S., 2002], y se utilizan principalmente con propósitos de clasificación, [Janikow, C.Z. 1998].

Un árbol de decisión es en esencia un modelo predictivo, que permite que las observaciones acerca de las características de un elemento conduzcan a conclusiones acerca de un valor objetivo. El árbol de decisión se representa mediante un grafo con estructura arbórea, hojas (nodos) y ramas, inducido desde un conjunto de: datos, objetivos, condiciones sobre los atributos y decisiones sobre los mismos.

Los nodos internos se corresponden con una condición elegida en el conjunto de atributos, y cada ramificación de un nodo interno representa un valor o un intervalo de valores del dominio de la condición del atributo, Figura 5.19. Los nodos terminales contienen una única etiqueta. Desde el nodo raíz del árbol hasta una determinada hoja, el camino conforma una regla o condición de clasificación. De hecho, un árbol de decisión representa un conjunto de restricciones o condiciones que se organizan de forma jerárquica, y se aplican sucesivamente desde un nodo raíz hasta un nodo terminal [García-Alegre M. C. 2010]. En este trabajo se

utilizan los árboles de decisión como un modelo de clasificación. Los árboles de decisión clásicos, se amplían con la integración de la lógica borrosa como modelo para el tratamiento de la incertidumbre inherente a los datos reales y al conocimiento declarativo del experto, que puede ser incompleto. El objetivo es fusionar el tratamiento de la incertidumbre con el razonamiento aproximado de la representación borrosa y de los arboles de decisión, conservando las ventajas de ambos. De esta forma se aumenta el poder de representación y la capacidad de aplicación de los arboles de decisión, añadiendo una componente adicional de conocimiento basada en el paradigma borroso [García-Alegre M. C. 2010].

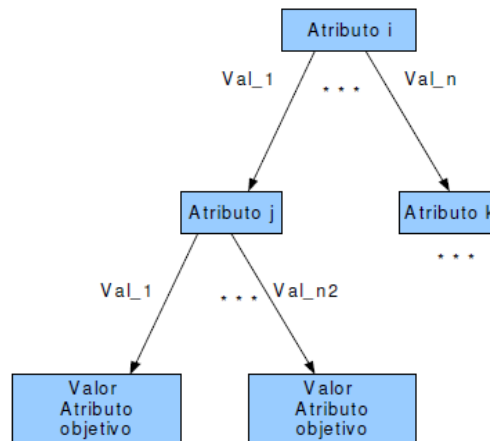


Figura 5.19. Estructura de un árbol de decisión.

Los arboles de decisión borroso se diferencian de los arboles de decisión clásicos, en dos aspectos fundamentales:

- Utilizan criterios de ramificación basados en restricciones borrosas.
- Los procesos de inferencia son diferentes. Los conjuntos borroso, definen los criterios de manera lingüística para la construcción del árbol.

Partiendo de este preámbulo, las variables o atributos que influyen en la toma de decisiones del estado de operación de la pila PEM son: {cambio pendiente $[\Delta P]$, oscilación de voltaje $[\sigma_v]$ y delta voltaje $[\Delta V]$ }.

En este caso el sistema de razonamiento aproximado propuesto a partir de un árbol de decisión borroso tiene por objetivo predecir, en tiempo real, los estados de la pila PEM: *Inundado*, *Normal*, y *Seco*, para cada ejemplo o conjunto de medidas.

▪ Inferencia y clasificación.

El conocimiento del sistema se encuentra embebido en un sistema de reglas estructuradas en el árbol de decisión borroso. En este modelo, cada nodo del árbol se corresponde con una variable Va_i , característica seleccionada que pertenece al conjunto de todas las variable Va . Los árboles de decisión presentan una fuerte estructura jerárquica entre las variables, esto es, aquellas que están en los órdenes superiores del árbol son las que poseen mayor poder de

discriminación y peso en la decisión, que las que se encuentren en los niveles más alejados del nodo raíz. Por ello, en el nodo raíz del árbol se encuentra la variable prioritaria, y en el nivel del árbol en el que los nodos tienen hijos, se encuentra la variable de menor relevancia para la toma de decisión. En el caso, la prioridad viene marcada por el grado de fiabilidad en la discriminación que tiene cada una de las características previamente seleccionadas:

V_{a_1} = Oscilación de VOLTAJE [σv]

V_{a_2} = Cambio PENDIENTE [ΔP]

V_{a_3} = DELTA Voltaje [ΔV]

El proceso de decisión opera siguiendo los pasos que a continuación se detallan:

- Exploración de la raíz del árbol. Para ello se toma el valor real de entrada de la variable correspondiente.
- Comprobación del valor de pertenencia $\mu(v_{ai})$, a cada una de las etiquetas lingüísticas que definen la variable.
- El algoritmo diseñado utiliza todos los valores de pertenencia obtenidos para asociar una etiqueta lingüística al valor de entrada.
- Se ramifica el nodo de la variable raíz, y se elige el camino del árbol que lleva al siguiente nodo, en función del valor lingüístico asignado al nodo padre.
- Este proceso se repite mientras queden variables por consultar, y no se haya llegado a un nodo hoja terminal.
- Una vez que se llega al final del árbol, el nodo hoja terminal cuenta con la información relativa al recorrido que ha llevado hasta él y la decisión del estado correspondiente.

La decisión relativa a los valores de los atributos que constituyen una entrada al sistema, Anexo I.4, es un mensaje en términos lingüísticos contenido en cada una de las hojas o nodos terminal.

A continuación se detalla el proceso de razonamiento mediante el análisis de un caso, con los valores numéricos medidos experimentalmente para las tres características mostradas en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Valores numéricos de las tres características obtenidas a partir de medidas experimentales durante la operación de la pila.

| <i>Oscilación Voltaje</i> | <i>Cambio Pendiente</i> | <i>Delta Voltaje</i> |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|
| 0.0036 | 0.435 | -0.013 |

- La variable de mayor relevancia es la **Oscilación Voltaje**. Por ello es la primera que se evalúa y se corresponde con el nodo raíz del árbol. Se calcula la pertenencia del valor de Oscilación de Voltaje a los tres conjuntos borrosos definidos: {BAJO, MEDIO, ALTO}.

- $\mu_{ov}^{BAJO}(0.0036) = 0$

- $\mu_{ov}^{\text{MEDIO}}(0.0036) = 0$
- $\mu_{ov}^{\text{ALTO}}(0.0036) = 1$
- Oscilación de Voltaje es **ALTO**, y por tanto se expande el nodo Oscilación Voltaje y se elige la rama correspondiente a ALTO, Figura 5.20.

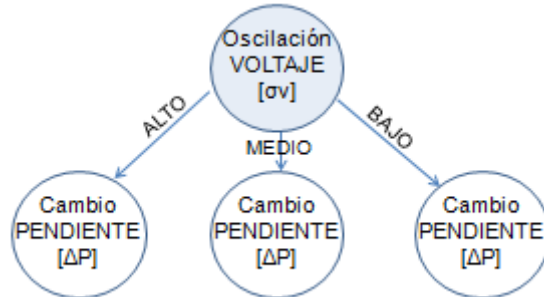


Figura 5.20. Evaluación del nodo raíz del árbol de decisión borroso.

- Se continúa evaluando la pertenencia de la siguiente variable, **Cambio Pendiente**, en función del valor numérico de la variable, y se calcula la pertenencia a los tres conjuntos borrosos {BAJO, MEDIO, ALTO}.
 - $\mu_{cp}^{\text{BAJO}}(0.435) = 0$
 - $\mu_{cp}^{\text{MEDIO}}(0.435) = 0$
 - $\mu_{cp}^{\text{ALTO}}(0.435) = 1$
- El valor de la variable, **Cambio Pendiente**, es **ALTO**, por tanto se expande el nodo **Cambio Pendiente** y se elige la rama correspondiente a ALTO, Figura 5.21.

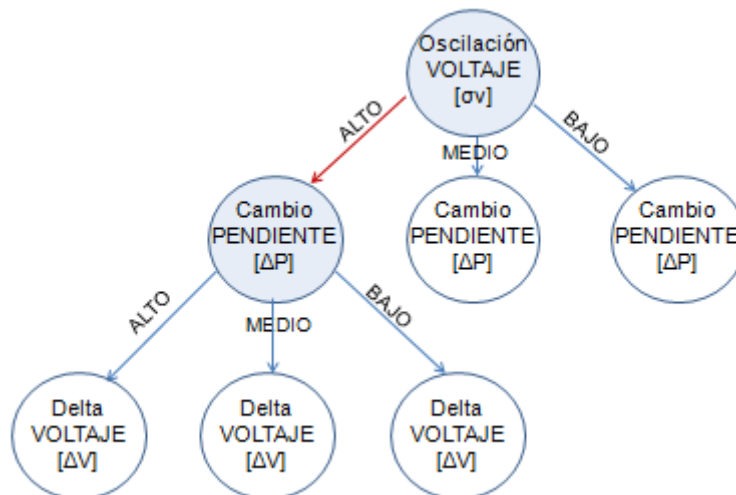


Figura 5.21. Evaluación del nodo interno Cambio de Pendiente en el árbol de decisión borroso.

- Se continúa evaluando la pertenencia de la siguiente variable, **Delta Voltaje**, en función de su valor numérico, y se calcula la pertenencia a los tres conjuntos borrosos {BAJO, MEDIO, ALTO}.

- $\mu_{dv}^{BAJO}(-0.013) = 1$
- $\mu_{dv}^{MEDIO}(-0.013) = 0$
- $\mu_{dv}^{ALTO}(-0.013) = 0$
- El valor de la variable, **Delta Voltaje**, se corresponde a **BAJO**, por tanto se expande el nodo **Delta Voltaje** y se elige la rama correspondiente a BAJO, Figura 5.22

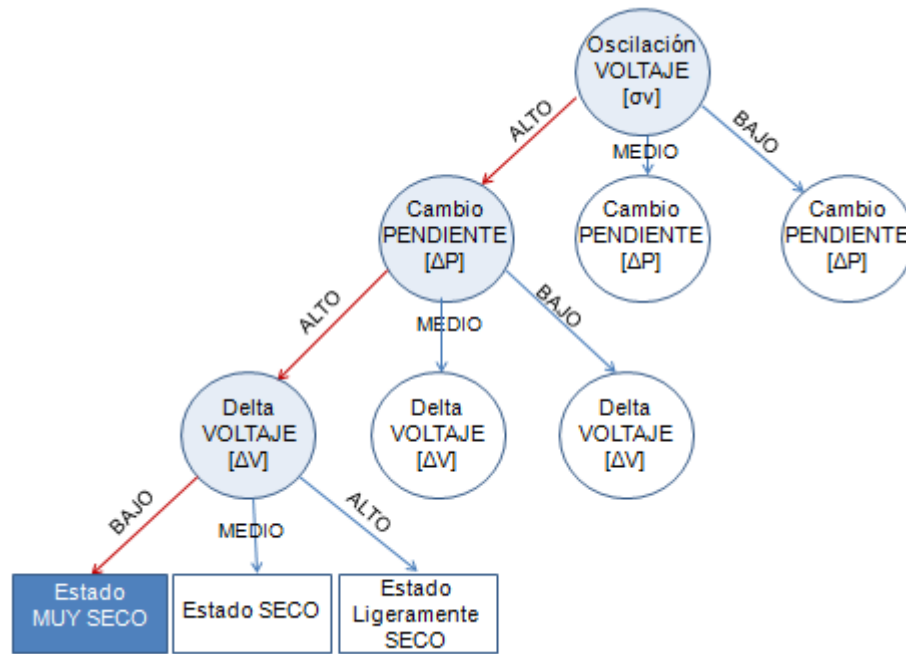


Figura 5.22. Evaluación del nodo interno Delta Voltaje del árbol de decisión borroso.

- Una vez que se llega al nodo Terminal, la exploración del árbol finaliza, y el resultado de la toma de decisión es la información contenida en el nodo hoja Terminal. En este caso se corresponde al estado **MUY SECO** de operación de la pila PEM.

El análisis de un caso, muestra el proceso de inferencia seguido para llegar a obtener la clasificación del estado de la pila PEM. Los nodos terminales contienen la estimación del estado de la pila.

En resumen, en función de los valores de pertenencia correspondientes al parámetro de mayor prioridad se avanza por una u otra rama del árbol de decisión y así sucesivamente hasta llegar a un nodo terminal. Al final, tras las divisiones y subdivisiones de los nodos, se llega a una estimación del estado de operación de la pila PEM en las siguientes categorías: *MUY SECO*, *SECO*, *Ligeramente SECO*, *NORMAL*, *Ligeramente INUNDADO*, *INUNDADO* y *MUY INUNDADO*, Figura 5.23.

La utilización conjunta de las tres variables confiere al modelo capacidad para resolver entre siete posibles estados. Las condiciones de las pilas y escenarios analizados en esta memoria, no requieren este grado de resolución, por lo que se han utilizado solo cinco. Esta posibilidad facilita la toma de acciones específicas cuando se detectan estados pre-críticos como, *Ligeramente SECO* o *Ligeramente INUNDADO*. Se ha realizado la unión entre cada una de

las clases que aparecen en los extremos con la clase adjacente, dado que las estrategias de control para salir de estas situaciones críticas eran iguales, Figura 5.23.

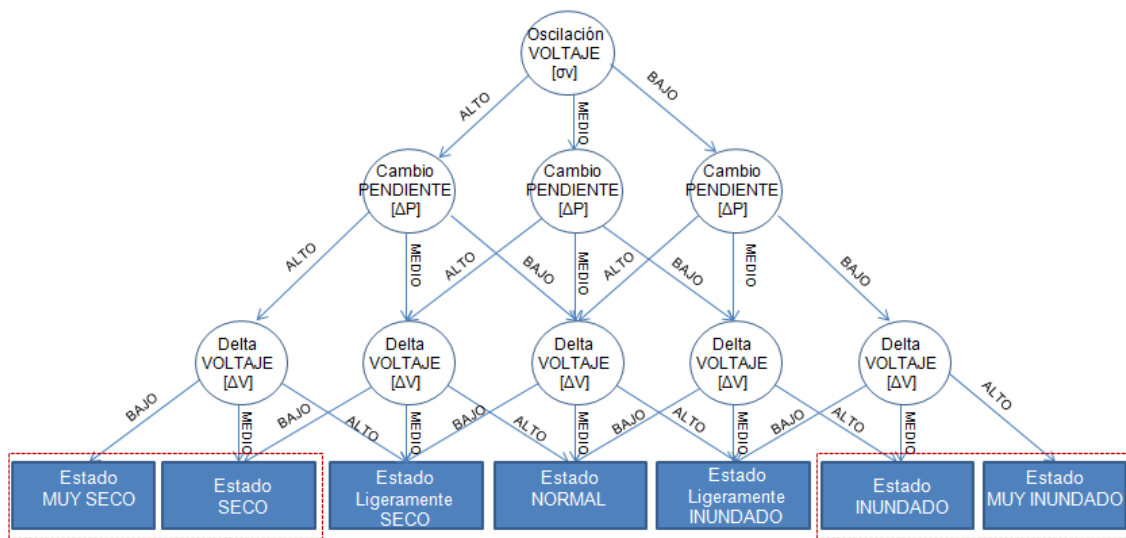


Figura 5.23. Árbol de decisión borroso implementado para la estimación del estado de operación de la pila PEM en función de los valores de las tres características seleccionadas.

A continuación se representa gráficamente, los resultados de la clasificación, combinando la capacidad de discriminación de parejas de características: *Amplitud de oscilación de voltaje* y punto de *Cambio de pendiente*, Figura 5.24.; *Diferencia de voltaje* y punto de *Cambio de pendiente*, Figura 5.25a; y finalmente, *Amplitud de oscilación de voltaje* y *diferencia de voltaje*, Figura 5.25b.

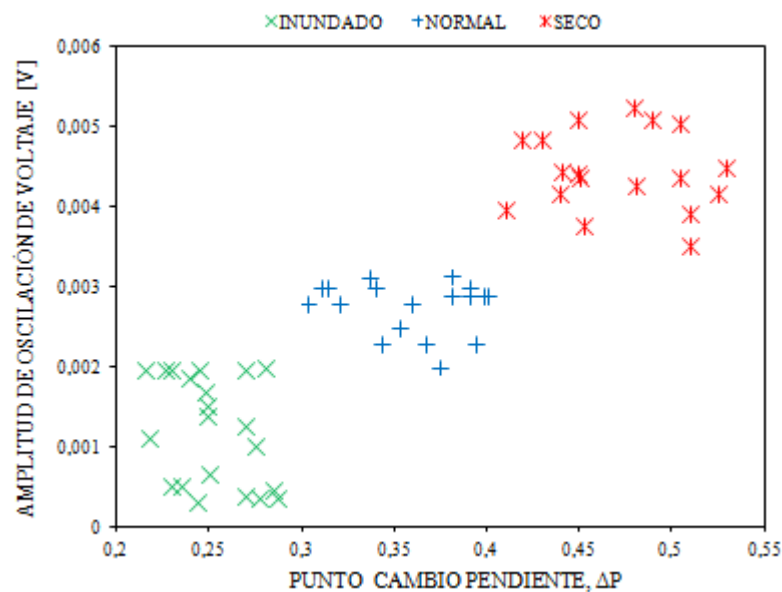


Figura 5.24. Representación de los valores de las características, *Amplitud de oscilación del voltaje* y *punto Cambio de pendiente*, para los estados de operación de la pila PEM: *Seco*, *Normal* e *Inundado*.

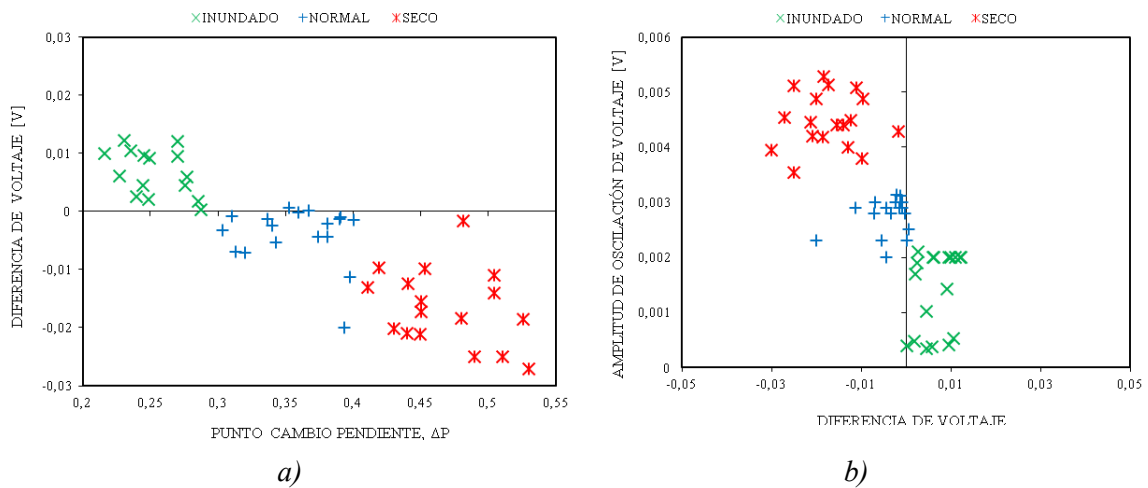


Figura 5.25. Representación de las características: a) Diferencia de voltaje y punto Cambio de pendiente. b) Amplitud de oscilación del voltaje y Diferencia de voltaje, para tres estados.

Aunque los pares de características que aparecen en las Figuras 5.24 y 5.25 son buenos para clasificar estados, los de la Figura 5.24 son superiores. Estos resultados confirman las hipótesis iniciales de que las características *Amplitud de oscilación del voltaje* y *punto Cambio de pendiente*, son las prioritarias y de ahí su correcta ubicación en el árbol de decisión.

Además, en la Figura 5.24, se observa una separación óptima entre los estados: *Seco*, *Normal* e *Inundado*. Esto ilustra como al estado *Seco* le corresponden la región de valores altos de ambas características, al *Normal* los valores medios y al estado *Inundado* los valores más bajos. Los resultados obtenidos demuestran la validez del modelo heurístico de árbol de decisión borroso, para combinar la información proporcionada por cada una de las características seleccionadas.

CAPÍTULO 6

Organización del conocimiento y control en una arquitectura de agentes expertos

Este capítulo presenta el diseño y desarrollo de la arquitectura propuesta para el control autónomo de la pila PEM en condiciones óptimas de funcionamiento. En la sección, 6.1, se exponen brevemente las características que presenta la pila PEM desde el punto de vista de control, y los objetivos de la arquitectura propuesta para el control autónomo de la pila PEM. En la segunda sección, 6.2, se exponen los principios que guían el diseño de la arquitectura, las características de los módulos que la componen y los flujos de información que la caracterizan. La sección 6.3 describe detalladamente la arquitectura propuesta con el objetivo de controlar de forma autónoma la pila PEM, para mantenerla en un estado determinado – control de estados–, que garantice el funcionamiento óptimo de la pila siguiendo criterios de potencia o eficiencia. La arquitectura de control, asegura tanto el funcionamiento a nivel básico de la pila PEM, esto es: control de umbrales, regulación de las variables de operación y el tipo de carga eléctrica (escenario) que se desee aplicar a la pila; como el control del punto de operación óptimo. En la última sección, 6.4 se describen tanto los experimentos realizados en el funcionamiento autónomo de varias pilas PEM, con distintos materiales de la membrana

y tamaño del área activa, como los resultados obtenidos, para validar la arquitectura de percepción y control basada en agentes expertos.

6.1. Control de la pila PEM

En el control de la pila de combustible PEM se precisa la existencia de procesos tanto deliberativos como reactivos que posibiliten la realización de las tareas de control ante un amplio intervalo de condiciones. Este último punto es fundamental para ajustar sus parámetros a la multiplicidad de circunstancias que se pueden producir en la operación de la pila. Ello se debe a que los sistemas de control clásicos no sean especialmente adecuados para tratar esta variabilidad unida a un comportamiento altamente no lineal de sus variables.

La inteligencia artificial ofrece aproximaciones cualitativas, que intentan emular los comportamientos reactivos de los humanos en la resolución de problemas, a pesar de no disponer de un conocimiento completo y preciso del sistema a controlar. La arquitectura propuesta integra conocimiento experto y estrategias para el control local o global de variables y subsistemas, recurriendo para ello, en algunos casos, a la utilización de técnicas de control inteligente.

6.1.1. Análisis del control de la pila PEM

Como se ha analizado en el Capítulo 3, la pila de combustible es un sistema complejo difícil de controlar, al no disponer de un modelo analítico completo y preciso. De hecho, desde el punto de vista de control, la pila PEM presenta características como:

- *Sistema con un conjunto amplio de sensores*, (variables a controlar). Aunque este aspecto es abordable con múltiples bucles simples de control, por lo general PID's o PI's, implantados en sistemas distribuidos, presenta el problema de la interrelación entre las variables.
- *Subsistemas fuertemente acoplados*, donde un ejemplo de ello, es la *gestión del grado de agua contenida en la pila*, pues su valor se ve alterado por las variables de estado: temperatura y humedad del gas inyectado, valores de caudales utilizados, e incluso de la propia carga aplicada a la pila. La ingeniería de procesos trata de conseguir que la complejidad de interacción entre estos subsistemas sea mínima, pues de este modo el control —manual o automático— del sistema es más simple y eficaz. No obstante, este desacoplamiento de subsistemas no es siempre alcanzable, por lo que desde la perspectiva clásica el control del proceso sólo es viable utilizando dos formas de control:
 - Control multivariable, que lleva asociado una alta dificultad. El uso de sistemas de control multivariable está restringido a procesos de complejidad limitada,

sobre todo debido al coste de desarrollo, instalación y puesta en marcha de los mismos.

- b) Control manual mediante un operador humano, que es un experto en el control del proceso. La identificación del operador como experto ha aproximado la inteligencia artificial al campo del control de procesos.
- *Carencia de modelos precisos de la pila PEM y de su comportamiento eléctrico*, por lo que su control queda muy restringido. De hecho, la identificación del sistema a controlar es un factor fundamental si se desea usar un control avanzado, pero sólo es viable cuando la dinámica del proceso está muy definida. En el caso de sistemas con estructura muy variable, como es la pila, la utilidad de un modelo reducido y la identificación del sistema, disminuyen. Las interacciones en la pila PEM son tantas y a tan bajo nivel, que la predicción de su respuesta, resulta imposible. Vuelve a surgir el operador humano y su sentido común para hacer frente a este problema, ya que con su capacidad de razonamiento y sobre todo con su experiencia en el funcionamiento del sistema, es capaz de determinar la acción de control más adecuada.

6.1.2. Objetivos de la arquitectura de control

Teniendo en cuenta las características y requerimientos de la pila PEM, se propone una arquitectura de control basada en agentes expertos, como modelo más apropiado para la consecución de un sistema de control autónomo de la misma.

Se trata de un modelo jerárquico con varios niveles de competencias, que gravitan en torno a una representación global de la pila PEM y donde cada nivel está compuesto por un conjunto de agentes expertos especializados.

En su diseño se han contemplado los principios básicos de:

- reusabilidad de habilidades
- facilidad de escalado
- definición explícita de un flujo bidireccional de información:
 - perceptiva de abajo-arriba, que se inicia en las señales sensoriales y puede llegar hasta el usuario
 - acciones de arriba-abajo, que se inicia con la definición de los objetivos y llega hasta los actuadores.

La arquitectura jerárquica de percepción y control que se propone tiene como objetivo principal la operación autónoma de la pila PEM en condiciones óptimas de humectación.

En su diseño se han considerado los siguientes requisitos:

- Orientada a conseguir objetivos locales de control (umbrales, variables de estado, carga eléctrica).

- Garantía de la seguridad física de la pila y del medio. Por ejemplo, evitar los estados de alta sequedad que pueden provocar la ruptura de la membrana y por tanto un cortocircuito químico. La seguridad implica, tanto capacidad de reaccionar a tiempo ante imprevistos (control de alertas), como robustez ante fallos del sistema.
- Interacción dinámica inteligente entre distintos controladores.
- Versatilidad o capacidad de adaptación a un conjunto amplio de pilas PEM, para la experimentación de nuevos catalizadores, membranas e incluso de placas terminales o de distribución de los gases.
- Diseño independiente de procesos, que facilita la incorporación gradual de nuevas habilidades sin perturbar los procesos ya existentes.
- Reutilización de procesos
- Escalable para admitir la integración de nuevos sensores y objetivos.

6.2. Estructura de la arquitectura de percepción y control

El término *Agente* ha sido objeto de gran controversia en múltiples campos, en especial los de la Inteligencia Artificial (AI), Ciencias de la Computación y Sistemas de Control [Bellifemine F. 2007]. En este trabajo, el término AGENTE se define como la unidad básica de la arquitectura de control y organización del conocimiento, entendido como “*proceso o conjunto de procesos dirigidos a conseguir o mantener un objetivo, con habilidades perceptivas, deliberativas y de actuación, sin restricción alguna en su complejidad y comunicación por paso de mensajes o memoria compartida*” [García-Alegre, M. 1998].

La interacción de los distintos agentes con el sistema y el entorno, y de ellos entre sí, genera una secuencia de acciones que conducen al objetivo global perseguido.

La definición clásica de comportamiento [Mataric, M. J. 1994], como “ley de control que agrupa un conjunto de restricciones para alcanzar y mantener un objetivo” se adapta menos a la filosofía planteada, al explicitar únicamente el aspecto de control en su definición, a pesar de que en muchos trabajos ambos términos, agente y comportamiento se utilizan indistintamente [García-Alegre, M., 1995] [Guinea D. 1995][García-Alegre, M. y Guinea, D. 1992][Cañas, J. y García-Alegre, M. 1999].

La denominación de agente en lugar de comportamiento pretende destacar que la arquitectura está compuesta por *módulos* con capacidades de percepción y acción, separadas. Además, el concepto de esquema definido por Arkin [Arkin, R. C. 1987] como “especificación genérica de un agente de cálculo”, es muy similar a la definición de agente propuesta en este trabajo, con la única diferencia en el origen del mismo, pues el término esquema proviene del campo de la Biología y la Psicología, mientras el término agente surge, en su definición inicial, del área de la Inteligencia Artificial. De ahí que, el término que se utilice para definir la unidad formal o bloque estructural básico de la arquitectura, viene determinado fundamentalmente por las raíces e historial del grupo investigador.

En la arquitectura propuesta, la noción de agente se ha establecido en los términos más generales posibles. En este trabajo se han definido dos tipos de agentes en función del tipo de procesamiento que realicen:

- agentes perceptivos
- agentes de actuación.

El encapsulamiento de los procesos perceptivos y de acción por separado facilita la reutilización y extensión de las habilidades perceptivas y de actuación, lo que resulta especialmente útil en sistemas complejos y no lineales, como es el caso de la pila PEM.

Los *agentes perceptivos* se dirigen a la elaboración y mantenimiento de la información requerida en las tareas de control. La percepción se concibe como orientada a la acción, y los recursos y mecanismos de control perceptivo vienen determinados por las necesidades de actuación. Mientras, los *agentes de actuación* tienen como finalidad tanto la determinación de la acción a seguir, utilizando las percepciones elaboradas por los agentes perceptivos y los objetivos de control.

Las percepciones y actuaciones se almacenan en una *memoria compartida* del tipo variables globales, de información con diferente grado de abstracción. La utilización de una memoria compartida permite desacoplar los niveles perceptivos de los de actuación, dotando a la arquitectura de mayor flexibilidad, ya que permite que agentes de actuación de alto nivel empleen datos sensoriales crudos o percepciones de bajo nivel.

En los agentes propuestos en esta arquitectura se distinguen tres aspectos fundamentales, Figura 6.1:

- 1) Procesos de cómputo y de comunicación que definen su competencia.
- 2) Variables o parámetros de la memoria compartida, requeridos.
- 3) Entradas y salidas asociadas a cada agente.

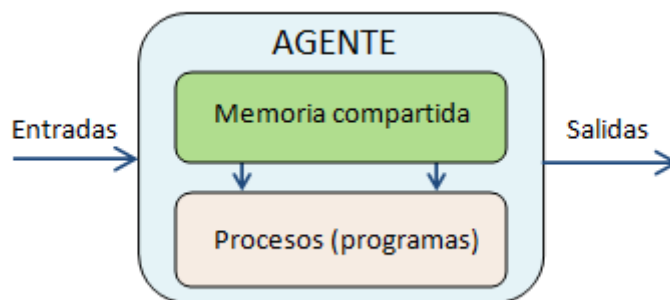


Figura 6.1. Esquema conceptual de un agente

Los *procesos* integrados en los agentes muestran habilidades perceptivas y de actuación de acuerdo con la definición inicial propuesta para el agente. Los agentes se han organizado jerárquicamente, de modo que cada agente inicia la ejecución de aquellos cuyas funciones necesita, permitiendo así la reutilización de agentes y facilitando la inclusión de agentes con nuevas habilidades. Desde este punto de vista, este tipo de arquitecturas pueden considerarse como “sociedades” de agentes. Sin embargo, aunque se trata de agentes organizados no se fuerza la existencia de niveles fijos estáticos lo que dota a la arquitectura de mayor flexibilidad. Los agentes se organizan siguiendo el criterio de reutilización de habilidades.

La **memoria compartida** contiene las medidas instantáneas de las variables de estado (memoria corto plazo), así como conceptos más abstractos (memoria a medio plazo) y parámetros relativos al sistema y a la aplicación (largo plazo). Los términos más abstractos, se encuentran próximos al lenguaje natural de los usuarios finales.

Las **señales de entrada y salida** de los agentes, se corresponden con las señales de activación que proceden o van dirigidas a un agente, necesarias para iniciar el ciclo de ejecución.

La información es compartida por los distintos agentes atendiendo a dos mecanismos clásicos:

- Paso de mensajes con una sintaxis y semántica previamente definida.
- Memoria compartida, que implícitamente organiza la información en niveles de abstracción.

Las percepciones o estímulos generados o detectados por los agentes perceptivos, se almacenan en variables globales para ser utilizados por diferentes agentes.

6.2.1. Procesos perceptivos

En la arquitectura propuesta para la organización del conocimiento y control de la pila PEM, la percepción se articula en torno a un conjunto de agentes perceptivos diseñados para la detección de los aspectos que se consideran clave para la consecución de los objetivos propuestos. Estos agentes implementan procesos de percepción orientados a la extracción de características relevantes del sistema, y son luego utilizados por los agentes de actuación. Los agentes perceptivos, a diferencia de los de actuación, poseen únicamente dos estados, alerta y activo, el paso de uno a otro estado está condicionado por la verificación de unas determinadas condiciones, Figura 6.2.

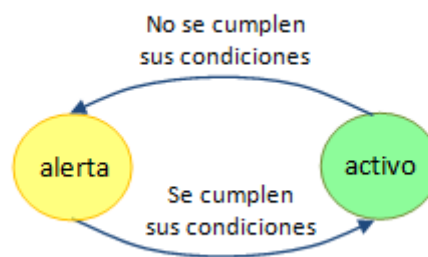


Figura 6.2 Transiciones de estado en los agentes perceptivos

Las percepciones elaboradas por los distintos agentes perceptivos, poseen distinto grado de abstracción y alcance espacio-temporal. La actualización de una determinada representación es responsabilidad de los agentes perceptivos que la generan.

6.2.2. Procesos de actuación

La acción se materializa mediante los agentes de actuación, que a lo largo de una secuencia de activaciones generan las acciones de control de las variables de operación de la pila PEM. Los

agentes de actuación se modelan siguiendo el esquema mostrado en la Figura 6.1, y pueden encontrarse en 3 estados de activación: inactivo, alerta y activo. En el **estado inactivo** el agente es un proceso o conjunto de procesos que no se ejecutan. El agente inactivo pasa al **estado de alerta** al recibir una señal de activación. En este estado comprueba cíclicamente si el contexto definido para su ejecución se cumple, y si es así pasa al **estado activo**, lo que implica que se procede a la toma de decisiones de actuación, bien sea sobre los actuadores físicos o sobre el estado de alerta de otros agentes.

El diagrama de estados de la Figura 6.3 incluye además las transiciones tanto de estado **activo** a **alerta**, en el caso de que se dejen de verificar sus condiciones de activación, como de estado de **alerta** a **inactivo** al recibir una señal de desactivación.

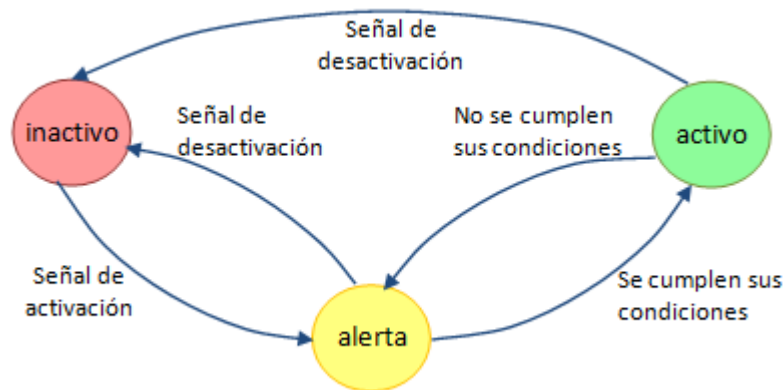


Figura 6.3 Transiciones de estado entre los agentes de actuación

6.3. Arquitectura de percepción y control basada en agentes expertos

La puesta a punto de nuevos diseños o la validación de nuevos componentes de las pilas PEM pasa por la caracterización de su respuesta eléctrica bajo unas determinadas condiciones, tanto de operación (variables de *estado*), y potencia a suministrar (variación de *carga eléctrica*), como de humectación óptima (estado *Normal*).

Unas condiciones adecuadas de humectación de la membrana, son fundamentales para aumentar el rendimiento eléctrico, alargar la vida útil de la pila y evitar daños irreversibles en sus componentes. De hecho, en la mayoría de las aplicaciones en las que una pila de combustible PEM suministra potencia eléctrica de forma individual o como componente de un sistema, los coches híbridos (pila PEM + batería), se precisa un funcionamiento autónomo en condiciones óptimas de humectación y con alto rendimiento tanto en potencia como en consumo.

Para ello se requiere un sistema de estimación de estado [Agila W., 2011][Agila W., 2012], control y gestión de la pila que mantenga de forma autónoma su operación con las mejores prestaciones de humectación y respuesta eléctrica, atendiendo además a criterios de seguridad. Con esta finalidad se han diseñado e implementado un conjunto de agentes específicos

siguiendo las líneas genéricas de diseño propuestas en la arquitectura de control basada en agentes expertos.

Además, la trayectoria de puntos de operación a seguir por el sistema de control y gestión de la pila, está sujeta a restricciones y requisitos impuestos inicialmente por el OPERADOR.

Por ello, es necesario un proceso de configuración inicial (Agente CONFIGURAR) de:

- variables de estado, (Temperatura, Humedad, Caudales y Presión).
- variables de la aplicación o escenario al que la pila suministra energía. Se tiene que atender a criterios de caracterización tanto de la pila (Agente CALCULAR CURVA V-I) como de la aplicación (CONTROL RENDIMIENTO), este último concepto, persigue maximizar la potencia eléctrica y minimizar el consumo de combustible.
- estado de operación objetivo:
 - *Normal*, región del espacio de estados con las mejores condiciones para el transporte de protones, redundando en un aumento de la vida útil de la membrana y del rendimiento eléctrico.
 - *Seco*, zona de daños irreversibles en la membrana.
 - *Inundado*, zona de bajo rendimiento y pérdida de combustible.

En el escenario de trabajo, tanto en modo caracterización como en aplicación comparten la necesidad de seguridad ante imprevistos (Agente GESTIONAR ALERTA). La arquitectura de control hace uso, en los niveles superiores de abstracción, de estrategias de detección y actuación que difieren en uno u otro escenario de trabajo. No obstante, algunos agentes como los del bajo nivel (agentes CONTROL P, CONTROL Q, CONTROL T, CONTROL H y CONTROL CARGA) embebidos en la red de microprocesadores pueden ser reutilizados, optimizando de este modo el tiempo de diseño y desarrollo de la arquitectura para otros sistemas y/o escenarios (aplicaciones).

La jerarquía propuesta en la arquitectura de control basada en agentes expertos, propuesta para lograr el funcionamiento autónomo de la pila PEM, en condiciones óptimas de humedad de la membrana, se muestra en la Figura 6.4.

El objetivo consiste en mantener estable el funcionamiento de la pila en condiciones óptimas de operación, de forma autónoma, siguiendo las condiciones iniciales prefijadas. Este objetivo general puede descomponerse en los siguientes subobjetivos:

- Mantener estables los puntos de operación de las variables de estado de la pila y de la aplicación (escenario)
- Estimar en tiempo real el estado de operación de la pila.
- Determinar las acciones de control necesarias para alejar el punto de operación de las zonas críticas.
- Generar alertas para dotar de seguridad a la pila ante posibles daños permanentes, debidos tanto a operaciones fuera de regiones seguras del espacio de estados, como, a fallos en los sensores o en los controladores.

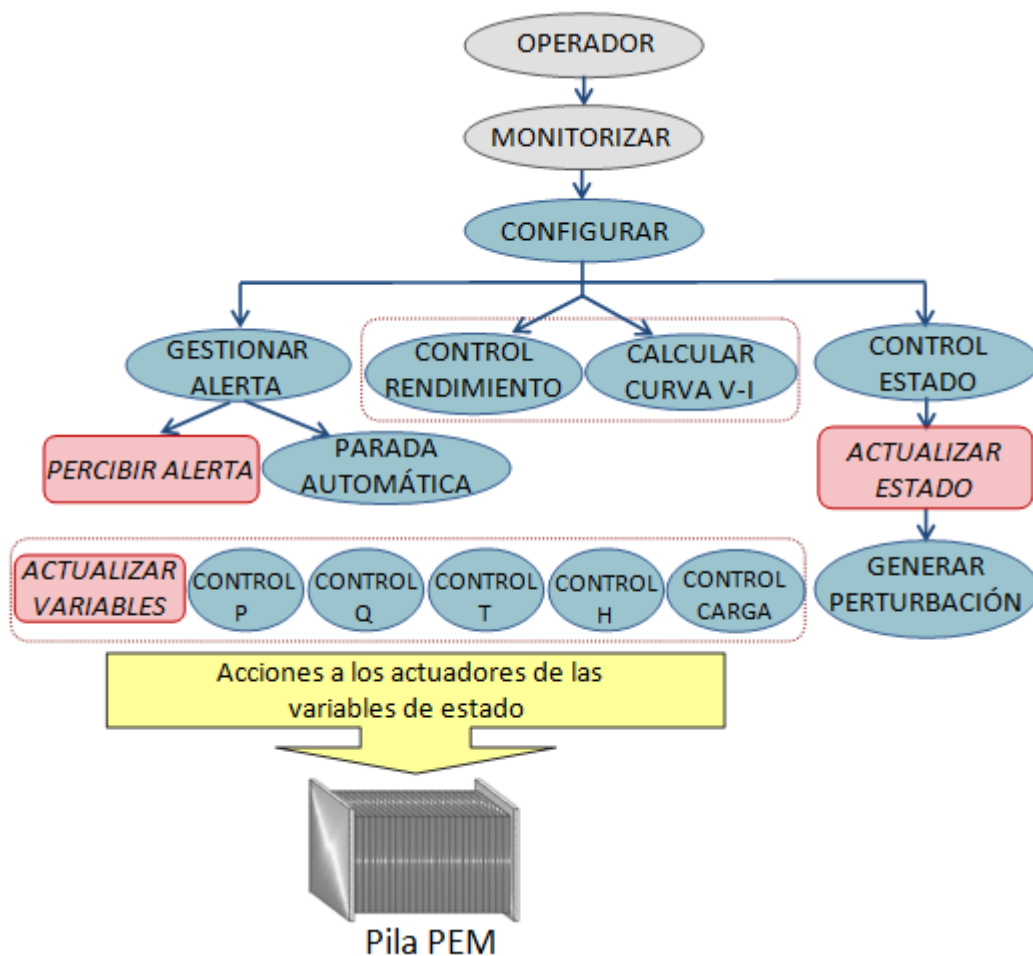


Figura 6.4 Jerarquía de agentes expertos para control autónomo de la pila PEM en condiciones óptimas de humectación.

A continuación se describe la secuencia de activaciones de los diferentes agentes para conseguir el objetivo de control. El OPERADOR inicia la secuencia ejecutando al agente de actuación MONITORIZAR, aplicación software implementada como un bucle infinito de escritura y lectura hacia y desde la memoria compartida, respectivamente, con un tiempo de espera asignado. MONITORIZAR es el agente experto de más alto nivel, encargado de modular el canal de comunicación, esto es, de establecer la conexión con la red de microprocesadores para el envío de consignas a los agentes de bajo nivel (agentes CONTROL P, Q, T, H, CARGA). También recibe del agente ACTUALIZAR VARIABLES las medidas sensoriales y realiza tareas de almacenamiento de datos y representación temporal de las variables a monitorizar, actualizandolas en la memoria compartida para que otros agentes las utilicen, como es el caso del agente PERCIBIR ALERTA.

A continuación se procede a configurar las condiciones iniciales del sistema y de la aplicación, y para ello, el OPERADOR procede a **activar** al agente de actuación CONFIGURAR.

El agente CONFIGURAR coordina la ejecución de los agentes para el funcionamiento seguro y autónomo de la pila de combustible PEM, de acuerdo a las especificaciones formuladas por el OPERADOR. Al estar el agente CONFIGURAR, orientado a trabajar con diferentes tipos

de escenarios, las tareas a realizar son, por una parte, definir los criterios de optimización que se persigan, como: maximizar la potencia eléctrica (P_{\max}) y minimizar el consumo de combustible ($Q_{H2\min}$), y por otra, gestionar el grado de humectación en la pila.

El agente CONFIGURAR depende de los agentes de actuación, CONTROL RENDIMIENTO y CONTROL ESTADO respectivamente, para el control de ambos requisitos, indispensables en el estudio de nuevas aplicaciones de una pila PEM. Sin embargo, en algunas ocasiones puede ser necesaria solo una caracterización de la pila (simples barridos de carga eléctrica) o del escenario de carga mediante el agente de actuación CALCULAR CURVA V-I. La implementación del agente de actuación CALCULAR CURVA V-I dota de una mayor flexibilidad al sistema al abarcar un mayor número de aplicaciones (escenarios) en el suministro de potencia por parte de la pila PEM.

Para mantener estable el estado de operación, en este caso, estado *Normal*, el agente CONTROL ESTADO debe tomar las acciones correctas, por lo que necesita conocer en todo momento el estado de operación de la pila (grado de humectación), razón por la cual activa al agente perceptivo ACTUALIZAR ESTADO. La estimación del estado de operación se realiza mediante la aplicación a la pila de una secuencia de perturbaciones (estímulos) Capítulo 5, y por ello el agente ACTUALIZAR ESTADO activa al agente GENERAR PERTURBACIÓN.

El agente MONITORIZAR junto con los agentes de actuación de bajo nivel (CONTROL P, Q, T, H) son los encargados de controlar las variables de estado de la pila PEM a los valores de referencia fijados por el OPERADOR.

En un funcionamiento autónomo, se debe garantizar el buen funcionamiento tanto de la pila como de la instalación, atendiendo a la posible aparición de imprevistos para tomar las acciones reactivas necesarias. El agente GESTIONAR ALERTA actúa cuando los valores medidos se encuentran fuera de los umbrales establecidos o cuando la variable medida no alcanza la referencia después de un tiempo establecido, ya sea por errores en los sensores o daños en el actuador, Un ejemplo de ello, es la temperatura de la pila, pues para valores superiores a 90°C la membrana polimérica puede sufrir daños irreversibles. Otro problema pueden ser las fugas de gas en el sistema de suministro o en la propia pila PEM.

Cualquier estrategia de control implementada en el agente GESTIONAR ALERTA, necesita disponer de alertas actualizadas en cada instante, agente PERCIBIR ALERTA y activando al agente de actuación PARADA AUTOMÁTICA, cuando sea necesaria una acción reactiva de emergencia ante un fallo.

Una representación global segmentada en tres niveles de los agentes implicados en la arquitectura de control basada en agentes expertos, para funcionamiento autónomo en condiciones óptimas de humectación de la pila PEM, se muestra en la Figura 6.5.

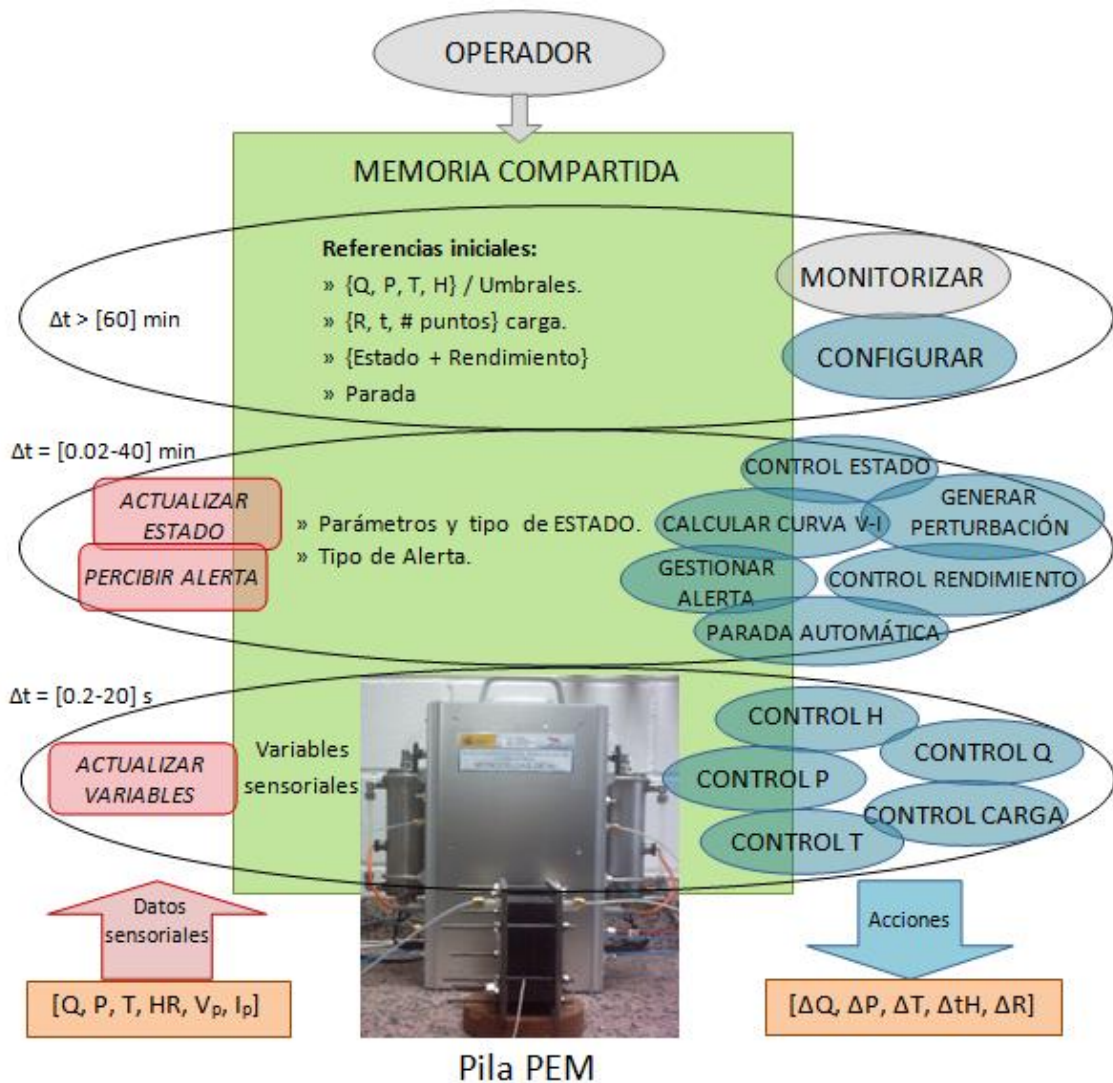


Figura 6.5 Arquitectura de agentes expertos de percepción y actuación: variables en memoria compartida y resolución temporal por niveles.

Las elipses de color azul y gris, situadas a la derecha de la Figura 6.5, corresponden a los *agentes de actuación*. Los rectángulos con esquinas redondeadas de color rojo, situados a la izquierda son los *agentes perceptivos*. En el centro de la imagen en color verde, se muestra el contenido de la *memoria compartida*. La *memoria compartida* contiene las variables globales necesarias para los agentes, tanto de actuación como de percepción, actuando de esta manera como canal de comunicación asíncrono entre ellos. La memoria compartida también proporciona el canal adecuado para la inyección inicial de la información, requerida para cada aplicación y sistema.

La descripción de la estructura en capas organizadas por tareas (agentes perceptivos y de actuación) se inicia con la capa de nivel inferior, esto es, el agente perceptivo *ACTUALIZAR VARIABLES* y los agentes de actuación básicos CONTROL P, Q, T, H y CARGA, que se corresponden a los controladores de bajo nivel localizados en la red de microprocesadores y se encuentran en contacto directo con los sensores y actuadores físicos y comparten una representación *temporal instantánea de corto alcance*.

La siguiente capa, está constituida por los agentes perceptivos *ACTUALIZAR ESTADO* y *PERCIBIR ALERTA*, y de actuación *CONTROL ESTADO*, *CALCULAR CURVA V-I*, *CONTROL RENDIMIENTO*, *GENERAR PERTURBACIÓN* *GESTIONAR ALERTA* y *PARADA AUTOMÁTICA*, que poseen una representación temporal de medio alcance. Los procesos perceptivos y deliberativos de esta capa, hacen uso de las habilidades de los agentes de la capa inferior, lo que dota de mayor flexibilidad a la arquitectura, un ejemplo de ello, lo constituyen los agentes *CALCULAR CURVA V-I* y *GENERAR PERTURBACIÓN* que necesitan las habilidades implementadas en el agente básico *CONTROL CARGA*. Además, esta capa permite incorporar nuevos agentes con habilidades y algoritmos para validar o ensayar con nuevos diseños de pilas PEM.

Los agentes de actuación *MONITORIZAR* y *CONFIGURAR* ubicados en la capa superior, mayor grado de abstracción y alcance temporal, poseen unos mecanismos de deliberación y un lenguaje (vocabulario y sintaxis) próximo al del *OPERADOR*, facilitando la comunicación a través del interfaz hombre-máquina, utilizado para configurar el experimento según los objetivos planteados, el tamaño de la pila PEM (potencia eléctrica generada), y visualización de las variables de estado en cada instante.

A continuación se describen en detalle cada uno de los agentes de la arquitectura de control. En primer lugar se describe la función y las restricciones de los agentes perceptivos, ya que son imprescindibles para la activación de la mayoría de los agentes de actuación.

6.3.1. Agentes perceptivos

- Agente *PERCIBIR ALERTA*.

El agente *PERCIBIR ALERTA* tiene como objetivo detectar y atender a las condiciones de operación que se encuentren fuera de los umbrales de operación de la pila PEM. El hecho de operar con pilas que poseen diferentes tamaños de área activa, ha generado, en algunas ocasiones, daños irreversibles en la pila. Un ejemplo, son los daños causados al fijar caudales excesivos en la operación con pequeños stack y no bajar las referencias al pasar a operar con una monocelda. Estas alteraciones de las variables de estado pueden surgir por averías en actuadores, error en los sensores, fugas de gas, u otros. La detección de estos fallos es imprescindible para dotar de seguridad tanto a los dispositivos físicos de la instalación como a la propia pila PEM.

La pila PEM es un dispositivo electroquímico que genera electricidad mientras se alimenta continuamente con hidrógeno y oxígeno en ánodo y cátodo respectivamente. Estos gases deben suministrarse en unas determinadas condiciones, y la variación de las mismas, altera la respuesta eléctrica de la pila. Tal y como se mostró en el Capítulo 3, un cambio en el valor de estas variables implica un cambio en el grado de humedad de la membrana, variación de R_m , lo que se refleja en un desplazamiento de la curva característica V-I. También en el Capítulo 5, sección 5.1.1, se describió la pérdida de eficiencia de la pila PEM debido a un nivel bajo de

humectación de la membrana. Otro ejemplo de pérdida de rendimiento eléctrico en la pila PEM, es la falta de combustible, estudiado experimentalmente en [Natarajan D., 2005].

El problema surge cuando los flujos de hidrógeno son inferiores a los requeridos, y la ausencia de reactante en determinadas zonas conlleva el desaprovechamiento de esa región activa de la pila, causando una caída de voltaje. Valores extremos de operación de estas variables pueden llevar a zonas de inestabilidad o de avería de la pila, como es el caso del estado de operación *Seco*.

Atendiendo a estas consideraciones de seguridad y rendimiento en la pila PEM, el agente *PERCIBIR ALERTA* se ha diseñado de forma que recibe las medidas de las variables de estado de operación del agente *MONITORIZAR* y los valores de referencia y umbrales de dichas variables del agente *CONFIGURAR*; en ambos casos a través de la memoria compartida.

- Entradas, salidas y procesos del agente PERCIBIR ALERTA.

El agente *PERCIBIR ALERTA* tiene como entradas: la señal de activación, los *umbrales* y *referencias* proporcionados por el OPERADOR, las variables medidas y la señal de la seta de emergencia; y como salida el *tipo de alerta*.

El algoritmo implementado en este agente requiere, en cada instante de ejecución, las medidas sensoriales de: caudal (Q), presión, (P), temperatura, (T), humedad relativa (HR), tensión e intensidad de la pila, V_p , I_p y Seta de emergencia. En la Figura 6.6, las señales sensoriales directas se han representado mediante un rectángulo naranja, el resto de las variables y parámetros se adquieren de la memoria compartida.

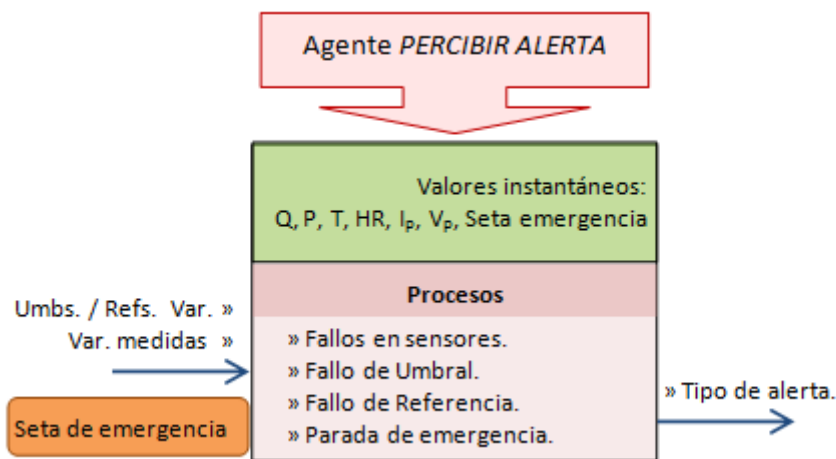


Figura 6.6 Agente *PERCIBIR ALERTA*.

En el diseño del algoritmo de cálculo se han tenido en cuenta, por una parte, las características de los sensores utilizados, esto es: intervalos de medida, resolución y tiempo de respuesta, y por otra, los valores mínimos y máximos que puede tomar la variable a controlar, para que no se produzcan daños irreversibles en la pila o dispositivos de la instalación. Estas características permiten estimar cuatro tipos de alerta.

- Fallos en los sensores. Para ello, se procede a la detección de las medidas sensoriales que estén fuera de sus límites de funcionamiento.
- Medidas sensoriales fuera de los umbrales.
- Imposibilidad de alcanzar la referencia en el intervalo de tiempo establecido
- Activación de Seta de emergencia. Aunque la activación de la seta de emergencia provoca la desconexión eléctrica de los dispositivos, su valor queda registrado.

La tabla 6.1 presenta las condiciones límites para el disparo de las alertas.

Tabla 6.1. Funciones de estimación de alerta.

| Tipo de alerta | Fallo | Condiciones |
|----------------|--------------------|---|
| 1 | Sensor | $\{(Lim. Inf.)_{fs} \leq V_i \leq (Lim. Sup.)_{fs}\}$ |
| 2 | Umbral | $\{(Lim. Inf.)_{Umb} \leq V_i \leq (Lim. Sup.)_{Umb}\}$ |
| 3 | Referencia | $\{V_i = V_{Ref.i} \rightarrow \Delta t\}$ |
| 4 | Paro de emergencia | [0 1] |

Donde: V_i representa las variables de operación: caudal, presión, humectación, temperatura y tensión de la pila; $(Lim. Inf.)_{fs}$ y $(Lim. Sup.)_{fs}$ simbolizan el intervalo de medida del sensor correspondiente a cada variable de operación; $(Lim. Inf.)_{Umb}$ y $(Lim. Sup.)_{Umb}$ corresponden a los umbrales. $V_{Ref.i}$ indica el valor de referencia de cada variable y Δt tiempo transcurrido hasta que la variable alcance la referencia.

El diagrama de flujo de información en el agente *PERCIBIR ALERTA* se presenta en la Figura 6.7. Donde N representa el total de restricciones que debe cumplir cada variable y n la restricción a analizar; n toma valores de [1–4], Tabla 6.1. El tiempo del ciclo de operación del agente *PERCIBIR ALERTA* viene determinado por la frecuencia de las lecturas proporcionadas por los sensores. En este caso, el agente *PERCIBIR ALERTA* se ejecuta en cada ciclo de control y es el encargado de mantener actualizada en memoria compartida la variable de salida *Tipo de Alerta*.

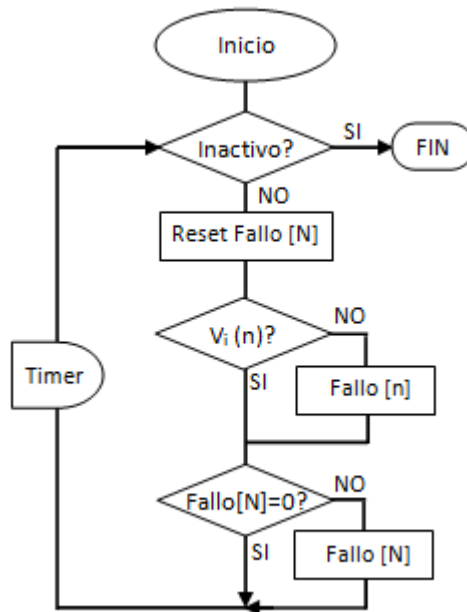


Figura 6.7 Flujo de información en el agente PERCIBIR ALERTA.

- Agente *ACTUALIZAR ESTADO*.

En la arquitectura propuesta, uno de los aspectos que debe primar es mantener controlado el punto de operación de la pila dentro de un determinado estado de operación, en este caso estado *Normal*.

Para que el agente CONTROL ESTADO, que gestiona el contenido de agua en la pila pueda distinguir cuándo y cómo tiene que actuar, es necesario identificar perfectamente en qué estado de operación se encuentra la pila, esto obliga al agente *ACTUALIZAR ESTADO* a mantener constantemente actualizada la variable Estado de la pila.

El hecho de encapsular el agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO* añade modularidad al sistema, de manera que este agente puede tener diversas implementaciones dependiendo del tipo de instrumentación o técnica utilizada para la estimación de la humectación en la pila, o, el algoritmo empleado para extraer la información necesaria de los datos sensoriales.

- *Entradas, salidas y procesos en el agente ACTUALIZAR ESTADO.*

En el agente *ACTUALIZAR ESTADO* el conocimiento para la estimación de estado es adquirido analizando la respuesta eléctrica temporal generada por la pila cuando ésta es sometida a unos determinados estímulos. En este sentido, una vez que pasa al estado **activo** el agente *ACTUALIZAR ESTADO* envía la señal de activación al agente de actuación GENERAR PERTURBACIÓN, los valores de las características $\{\Delta P, \sigma'_v, \Delta V\}$ calculadas se corresponden con las variables de entrada al algoritmo de decisión, basado en técnicas de razonamiento aproximado implementado en el agente ACTUALIZAR ESTADO. Figura 6.8.

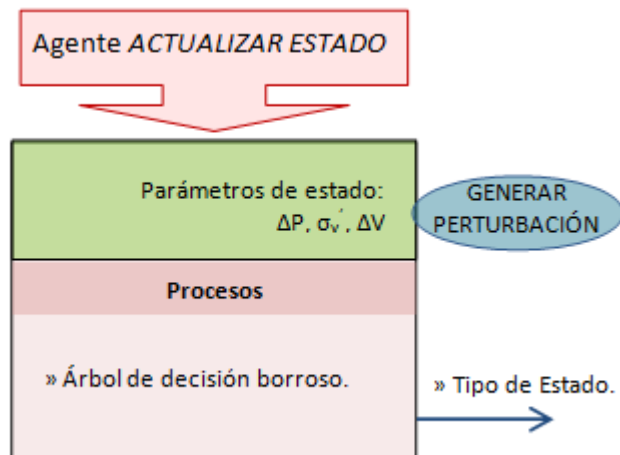


Figura 6.8 Agente perceptivo ACTUALIZAR ESTADO.

Para determinar en qué estado de operación se encuentra la pila, en función de los valores de las características de estado, el agente ACTUALIZAR ESTADO tiene implementado un algoritmo de decisión basado en un árbol de decisión borroso. Cada una de las características está definida mediante tres valores borrosos: {ALTO, MEDIO, BAJO}, donde la etiqueta lingüística “ALTO” corresponde al valor del parámetro obtenido en el estado *Seco*, “MEDIO” al valor del parámetro obtenido en el estado *Normal* y “BAJO” al valor del parámetro obtenido en el estado *Inundado*. La representación del conocimiento mediante árbol de decisión borroso, para la estimación del estado de la pila PEM está descrita en el apartado 5.3.3 de esta memoria.

En el agente ACTUALIZAR ESTADO, tiene como salida un término lingüístico que indica el estado: *Inundado*, *Ligeramente Inundado*, *Normal*, *Ligeramente Seco*, *Seco*. Figura 6.9.

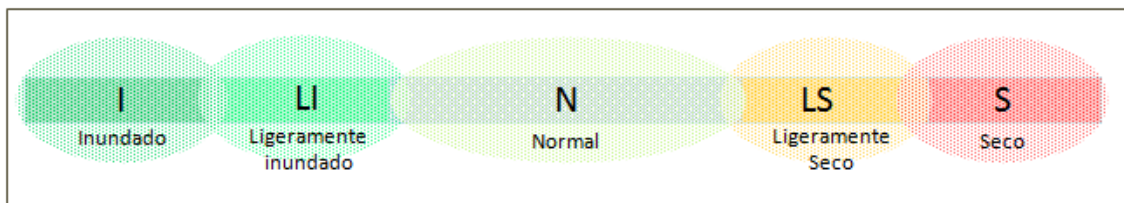


Figura 6.9 Estados de operación de la pila PEM, salida del agente ACTUALIZAR ESTADO.

6.3.2. Agentes de actuación

- Agente GESTIONAR ALERTA.

El agente GESTIONAR ALERTA garantiza el funcionamiento seguro de la pila PEM y de sus dispositivos auxiliares. Tiene dos objetivos:

- Informar al OPERADOR a través de mensajes sobre el tipo de alarma que se ha generado, mediante una salida sonora o visual en el interfaz de usuario del agente MONITORIZAR, o mediante el envío de mensaje de fallo, vía Ethernet.
- Enviar señal de activación al agente de actuación PARADA AUTOMÁTICA. Se puede volver a las condiciones de operación de la pila, previa reanudación por parte del operario. GESTIONAR ALERTA es un agente informativo de paso de umbrales, fallos en los sensores y actuadores, fugas de gas, de tal manera que se evite una situación de peligro para la integridad de la pila y entorno, por lo que necesita información actualizada del agente *PERCIBIR ALERTA*.

- Entradas, salidas y procesos en el agente GESTIONAR ALERTA.

El agente GESTIONAR ALERTA, necesita la información sobre el *Tipo de Alerta* generada por el agente *PERCIBIR ALERTA*, la señal *Fin proceso* generada por los agentes de actuación CALCULAR CURVA V-I y CONTROL RENDIMIENTO, la señal de *apagado inmediato* generada por el agente de actuación PARADA AUTOMÁTICA. Esta señal se utiliza para indicar al operario que se ha procedido a la parada automática del funcionamiento de la pila. Las salidas del agente son: Mensaje Remoto, o *envío de mensaje* vía Ethernet para control remoto; Mensaje Local, o *alarma visual y sonora* para control local; y señal *Inicio parada*, Figura 6.10.



Figura 6.10 Agente *GESTIONAR ALERTA*.

Una vez que el agente GESTIONAR ALERTA pasa al estado **activo**, se generan todas las salidas pudiendo volver a su estado de **alerta** con la confirmación del OPERADOR, una vez subsanado el problema. El agente GESTIONAR ALERTA se ejecuta en cada ciclo de control y mantiene actualizada en la memoria compartida, la señal de salida *Inicio parada*, que constituye la entrada al agente PARADA AUTOMÁTICA. En la Figura 6.11 se presenta el flujo de información en el agente GESTIONAR ALERTA.

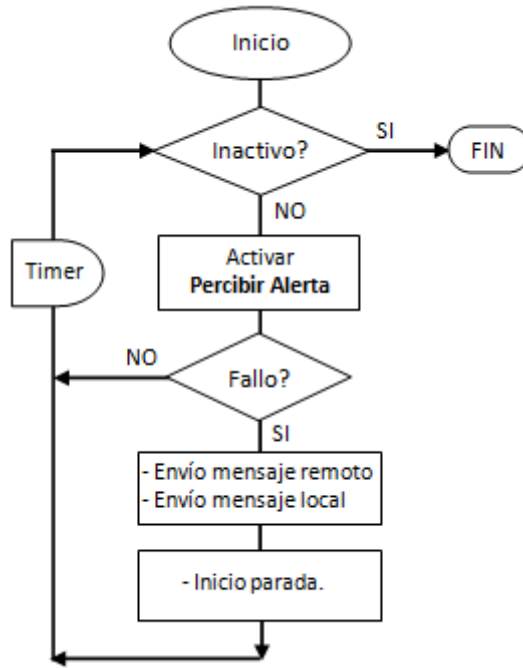


Figura 6.11 Diagrama de flujo de información del agente GESTIONAR ALERTA.

- Agente PARADA AUTOMÁTICA.

El agente PARADA AUTOMÁTICA es el bloque básico diseñado para garantizar una desconexión segura y completa del funcionamiento de la pila de combustible PEM, evitando daños irreversibles en la propia pila, como fracturas en la membrana o cortocircuitos químicos. En el estado **activo** el agente PARADA AUTOMÁTICA genera la orden de *apagado inmediato*, lo que se traduce en, poner las variables de estado a cero: $V_{i_{ref}} = \{0,0,0,0,0\}$. En un primer paso, se encarga de poner la carga en *circuito abierto*, eliminando la producción eléctrica de la pila, para evitar posibles daños al no disponer de suministro de combustible; y, seguidamente de poner las *consignas a cero* de las variables de operación, dejando los circuitos de suministro, libres de gases.

El agente PARADA AUTOMÁTICA tiene como entradas: la señal de *inicio parada* generada por el agente GESTIONAR ALERTA y la señal *Parada pila* activada por el OPERADOR, en cualquier instante, para interrumpir el funcionamiento global de la pila. Las salidas son: la señal *apagado inmediata*, que es la entrada a los agentes de actuación: GESTIONAR ALERTA, CONTROL ESTADO, CALCULAR CURVA V-I y GENERAR PERTURBACIÓN; y las referencias a cero de las variables de estado, Figura 6.12.

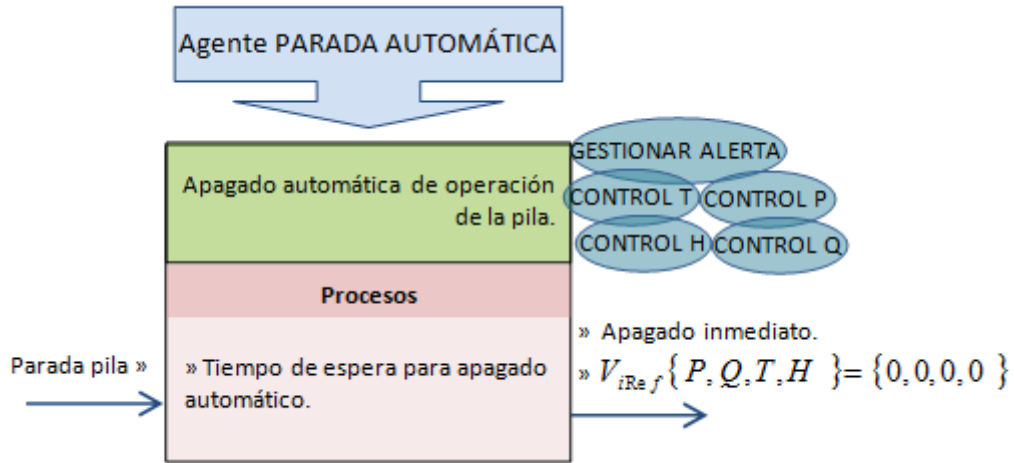


Figura 6.12 Agente PARADA AUTOMÁTICA.

La condición que permite al agente PARADA AUTOMÁTICA pasar del estado **alerta** al **activo** es la señal de *inicio parada*. En el estado **activo** el agente PARADA AUTOMÁTICA ejecuta los procesos que permiten realizar la parada inmediata de la pila de combustible. Encapsular los procesos de apagado inmediata en un agente – PARADA AUTOMÁTICA –, permite en un futuro generar diferentes tipos de apagado en función del tipo de alertas o incluso generar purgas de limpieza con N_2 al circuito de suministro de combustible o a la propia pila; habilidades muy importantes, pues se ha observado que se generan ligeras caídas de potencia por la aparición de impurezas en los gases.

De hecho, en esta primera fase, *Tiempo de espera para apagado automático* es un proceso en el cual una vez activado el agente PARADA AUTOMÁTICA, se activan las salidas una vez transcurrido un tiempo de espera $[\Delta t_{es}]$; que es el período de tiempo necesario para que el OPERADOR tome las medidas pertinentes y reinicie el funcionamiento de la pila, de lo contrario el agente toma el control y da la orden de apagado, Eq. (6.1).

$$t_{in.p} \geq \Delta t_{es} \Rightarrow V_{iRef} \{ 0, 0, 0, 0, 0 \} \uparrow \text{ y } \textit{parada inmediata} \uparrow \quad (6.1)$$

- Agente CALCULAR CURVA V-I.

Uno de los principales requisitos que debe cumplir un sistema de monitorización y control de pilas de combustible es flexibilidad para la *caracterización de la pila antes distintas demandas* de potencia eléctrica (aplicaciones o escenarios). En la arquitectura propuesta, se han contemplado estos dos requisitos indispensables para el avance de la tecnología.

Por una parte, el agente de actuación CONTROL RENDIMIENTO tiene por finalidad la configuración de un escenario de trabajo para aplicaciones reales de la pila. Mientras que, el agente CALCULAR CURVA V-I tiene por objetivo facilitar la configuración del tipo de escenario para la *caracterización eléctrica* de la pila PEM. Este objetivo puede descomponerse en dos subobjetivos concurrentes, al aplicar a la pila PEM una *carga*:

- *variable* en el tiempo, seleccionando el número de puntos de carga a aplicar. La variación de carga permite tener una visión global de la respuesta eléctrica de la pila.
- *constante* en el tiempo, objetivo que permite estudiar la vida útil de los componentes de la pila, como es la membrana.

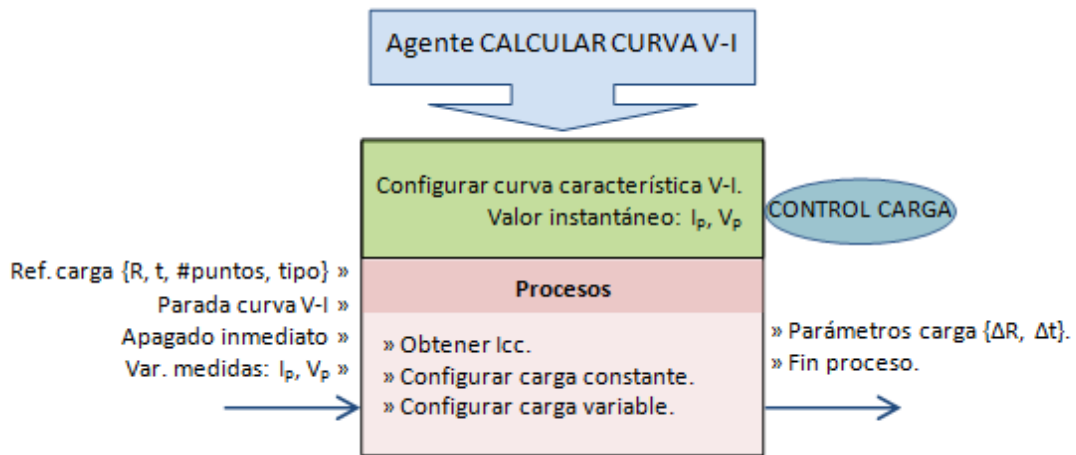


Figura 6.13 Agente CALCULAR CURVA V-I.

- Entradas, salidas y procesos en el agente CALCULAR CURVA V-I.

Tal como se muestra en la Figura 6.13, el agente CALCULAR CURVA V-I tiene como entradas: los *datos* de configuración del tipo de carga a aplicar, la señal *parada curva V-I* desde el OPERADOR a través del agente CONFIGURAR, la señal de *apagado inmediato* por parte del agente PARADA AUTOMÁTICA en caso de emergencia o parada general, y las *variables medidas* de intensidad y voltaje de la pila y la señal de activación.

Las salidas del agente son los *parámetros de carga* eléctrica, como: cambio en la resistencia eléctrica (ΔR) y en el tiempo (Δt), y la señal *Fin de procesos* indicando la terminación del test. El agente CALCULAR CURVA V-I mantiene actualizados los parámetros de carga en la memoria compartida, para que el agente MONITORIZAR los envíe al agente básico de actuación CONTROL CARGA para que gestione el dispositivo de la carga eléctrica incorporada.

La condición que permite al agente CALCULAR CURVA V-I pasar del estado **alerta** al estado **activo** es la complementaria a la del agente PARADA AUTOMÁTICA, esto es: que no se haya detectado ningún fallo, ni activado la parada por parte del operario, ni que otro agente desee configurar o cambiar el tipo de carga a aplicar a la pila PEM. La presencia de un fallo o parada provoca la desactivación de este agente, previa a la desconexión de la potencia solicitada a la pila, es decir, la carga se pone en circuito abierto ($I_p = 0$).

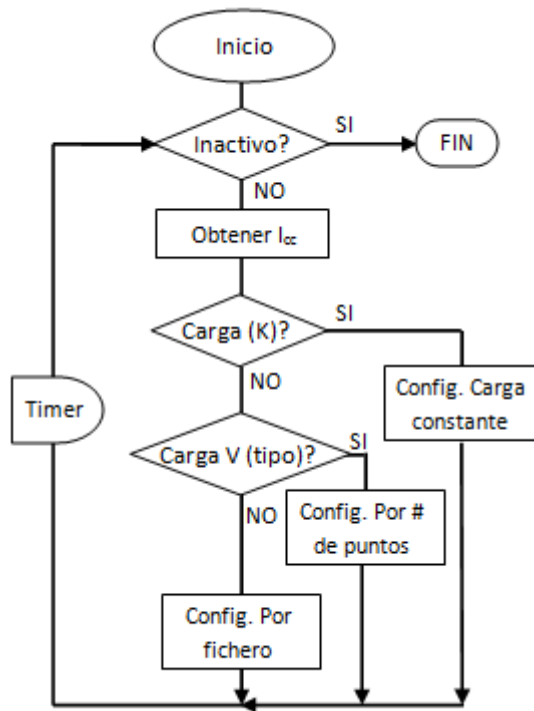


Figura 6.14 Flujo de información en el agente CALCULAR CURVA V-I.

El agente CALCULAR CURVA V-I incorpora tres estrategias. La primera de ellas, *obtener corriente de cortocircuito, Icc*, para ello el proceso realiza un barrido de carga automático, cambios de resistencia a un determinado intervalo de tiempo, antes de proceder a determinar los valores de los parámetros de carga según el tipo de carga configurado. Los otros procesos que hacen uso del valor de *Icc*, se encargan de acondicionar los parámetros de carga, para ser enviados por el agente MONITORIZAR al controlador de bajo nivel en función de los *datos de carga* $\{\Delta R, \Delta t\}$. En la Figura 6.14 se muestra el flujo de información en el agente CALCULAR CURVA V-I.

- Agente CONTROL RENDIMIENTO.

El agente CONTROL RENDIMIENTO está diseñado para buscar la trayectoria óptima (punto de máxima potencia o máxima eficiencia) de la respuesta eléctrica de la pila, de acuerdo con unos criterios o heurísticos previamente establecidos, que pueden variar de un escenario a otro. El conocimiento, implícito en los heurísticos, se traduce posteriormente en una función analítica de coste, que determina cuales son los valores óptimos de carga y caudal, entre todas las alternativas posibles, atendiendo siempre al criterio de seguridad: mantener a la pila fuera de los subespacios de estados críticos.

- Entradas, salidas y procesos en el agente CONTROL RENDIMIENTO.

El objetivo del agente CONTROL RENDIMIENTO es llevar el punto de operación de la respuesta eléctrica generada por la pila PEM, bajo unas condiciones de operación prefijadas

por el OPERADOR, hacia el punto de *máxima potencia*, Eq. (6.2) o *máxima eficiencia*, Eq. (6.3).

$$P_p = (V_p \times I_p) \text{máx.} \quad (6.2)$$

$$\eta_p = \left(\frac{V_p \times I_p}{Q_{H2}} \right) \text{máx.} \quad (6.3)$$

Para ello, necesita conocer en cada instante los valores de las variables: intensidad I_p y voltaje V_p de la pila, y caudal de hidrógeno, que constituyen las entradas del agente. Las salidas son:

- Cambio de carga ΔR , para el control de potencia. Es la entrada al agente de actuación CONTROL CARGA.
- Cambio de caudal ΔQ para el control de la eficiencia. Se corresponde a la entrada al agente de actuación CONTROL Q, según el tipo de control de rendimiento y el tiempo de operación de la pila en esas condiciones (parámetros definido por el OPERADOR).
- Variables de rendimiento: *Potencia máxima P* y *Eficiencia máxima η* , para la monitorización. En este agente solo se ha implementado la *Potencia máxima*.
- Señal fin de proceso, que indica la terminación del ensayo por tiempo.

En el agente CONTROL RENDIMIENTO, Figura 6.15, el cálculo de Potencia máxima viene determinada por la técnica del GRADIENTE, Eq. (6.4), donde, Δ son incrementos, y el incremento (o decremento) de carga R a aplicar, es ΔR . En principio tanto el incremento como el decremento se aproximan al valor más cercano por arriba o por debajo, respectivamente.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } P(R + \Delta R) > P(R) \Rightarrow \Delta R \uparrow \\ \text{Si } P(R - \Delta R) > P(R) \Rightarrow \Delta R \downarrow \\ \text{Si } P(R - \Delta R) < P(R) < P(R + \Delta R) \Rightarrow \Delta R \Leftrightarrow \end{array} \right. \quad (6.4)$$

El agente CONTROL RENDIMIENTO una vez **activo** se ejecuta en cada intervalo de tiempo Δt , con el objetivo de estabilizar la respuesta eléctrica de la pila después de realizado el cambio de carga por el agente de actuación CONTROL CARGA.

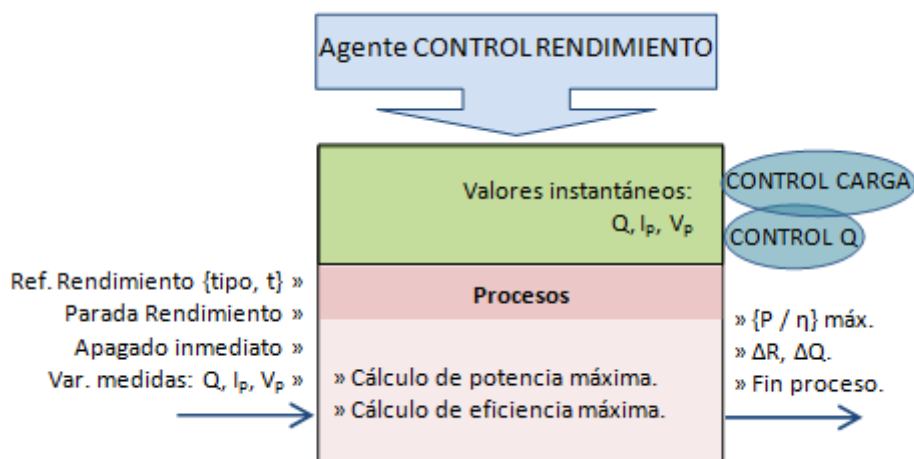


Figura 6.15 Agente de actuación CONTROL RENDIMIENTO.

En resumen, los agentes de actuación CALCULAR CURVA V-I y CONTROL RENDIMIENTO son los encargados de configurar y controlar el tipo de aplicación (escenario) de la pila de combustible. Son agentes mutuamente excluyentes respecto al funcionamiento, y la modulación de su activación inicial es realizada por el OPERADOR.

- Agente GENERAR PERTURBACIÓN.

El agente GENERAR PERTURBACIÓN tiene asignadas las tareas de Control de las perturbaciones que hay que aplicar a la pila PEM: Salto de Carga, Frecuencia de Oscilación de Intensidad y Salto de Caudal. Para ello, el agente GENERAR PERTURBACIÓN utiliza las habilidades de los agentes de actuación de bajo nivel CONTROL CARGA y CONTROL Q.

Por otro lado se encarga de los procesos de extracción de características relevantes, a partir de la respuesta eléctrica temporal (V_p , I_p) generada por la pila, ante los estímulos. Es un agente muy especializado en unas tareas que tienen por objetivo determinar los valores de las *características de estado*: {punto cambio de pendiente ΔP , en el salto de carga; amplitud de voltaje σ'_v , en la frecuencia de oscilación de intensidad; y, diferencia de tensión ΔV en el salto de caudal anódico}. El valor de estos parámetros tiene una estrecha relación con el grado de humectación de la membrana y el estado de operación de la pila, sección 5.2.4

- Entradas, salidas y procesos en el agente GENERAR PERTURBACIÓN.

En el agente GENERAR PERTURBACIÓN, los nuevos valores de carga y caudal cático, controlados por los agentes de actuación de bajo nivel, se aplican en uno de los tres puntos seleccionados de la curva de polarización V-I, Figura 6.16, sección 5.2.2.

Como se observa en la Figura 6.16, estos puntos están directamente relacionados con la corriente de cortocircuito I_{cc} , por lo que, es imprescindible calcular su valor. En esta dirección, una vez **activo** el agente GENERAR PERTURBACIÓN, envía la señal de activación y los parámetros de carga al agente de actuación CALCULAR CURVA V-I, con el objetivo de realizar un barrido de carga desde circuito abierto ($I_p=0$) hasta la intensidad máxima generada por la pila (I_{cc}). A continuación, se fija un punto de trabajo, $I_{cc}/2$, y el

agente CALCULAR CURVA V-I se encarga de mantener a la pila operando en ese punto de trabajo, configuración en modo carga constante del agente CALCULAR CURVA V-I.

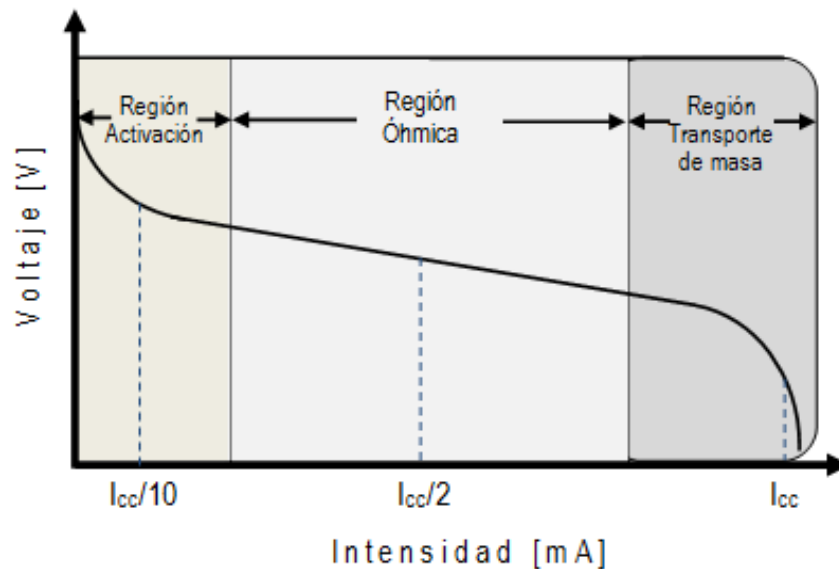


Figura 6.16. Localización de los tres puntos de la curva V-I $\{I_{cc}/10, I_{cc}/2, I_{cc}\}$ donde se aplican las perturbaciones.

A partir de aquí se aplica la secuencia de perturbaciones o estímulos a la pila: Salto de Carga, cuyo valor es igual al 20% de I_{cc} , Frecuencia de Oscilación de Intensidad y Salto de Caudal. Después de la aplicación de cada perturbación, el agente GENERAR PERTURBACIÓN ejecuta el algoritmo de cálculo implementado en el proceso, para la extracción de las características:

- cambio de pendiente, ΔP
- amplitud de oscilación, σ'_v
- diferencia de tensión, ΔV

El valor de estos parámetros o características se asocia a la variable parámetros de estado, que constituye la salida del agente GENERAR PERTURBACIÓN. En la Figura 6.17, se ilustra el esquema de entradas, salidas, y procesos del agente GENERAR PERTURBACIÓN. En el Capítulo 5.2 se han descrito en detalle las técnicas de perturbación y los algoritmos implementados en el agente GENERAR PERTURBACIÓN.

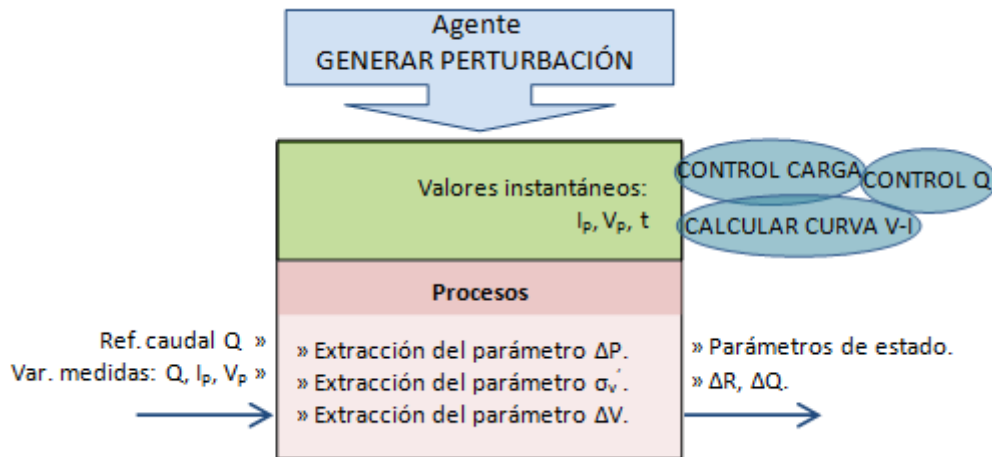


Figura 6.17 Agente de actuación GENERAR PERTURBACIÓN.

Para generar estos estímulos el agente GENERAR PERTURBACIÓN debe modular la activación junto con sus nuevos valores de referencia, que vienen a ser las entradas en los agentes de actuación CALCULAR CURVA V-I, CONTROL CARGA y CONTROL Q. Así, para el estímulo *salto de caudal* el agente GENERAR PERTURBACIÓN envía al agente CONTROL Q la señal de activación y el nuevo valor de referencia de caudal. Una vez finalizada la aplicación de la perturbación *salto de caudal*, el agente GENERAR PERTURBACIÓN deja el control de la variable de referencia caudal, al agente CONFIGURAR, y desactiva la señal de activación. Sin embargo, para generar los estímulos de *salto de carga* y *frecuencia de oscilaciones de intensidad* en el punto de trabajo seleccionado (I_{cc} , $I_{cc}/2$ o $I_{cc}/10$). El agente GENERAR PERTURBACIÓN, toma el control del agente CONTROL CARGA, enviando la señal de activación y los respectivos valores de modulación de la carga eléctrica, Figura 6.18.

Por otro lado, el agente GENERAR PERTURBACIÓN, una vez **activo** tiene prioridad sobre los agentes CONTROL Q, CONTROL CARGA y CALCULAR CURVA V-I, tomando su control. Durante el tiempo de ejecución del agente GENERAR PERTURBACIÓN, las variables de estado que no intervienen en las perturbaciones, se mantienen estables con los valores prefijados inicialmente por el OPERADOR.

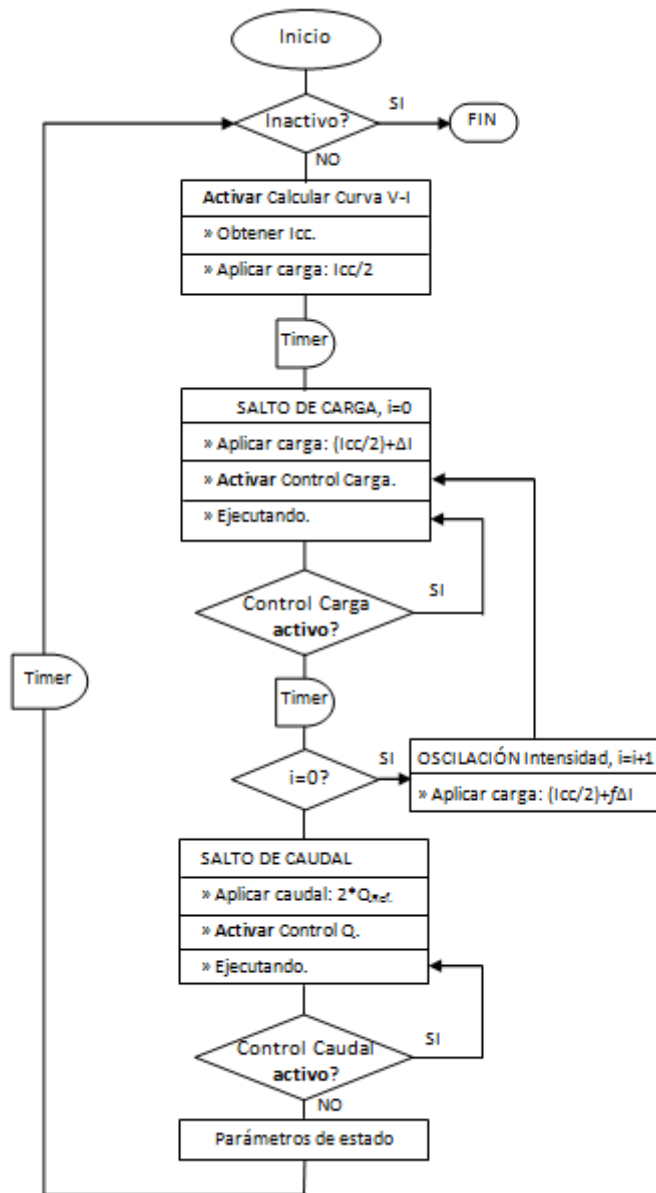


Figura 6.18. Diagrama de flujo de información del agente *GENERAR PERTURBACIÓN*.

- Agente CONTROL ESTADO.

Una de las habilidades requeridas por un sistema de gestión de pilas de combustible PEM, consiste en mantener a la pila alejada de los estados críticos de operación, desviando su trayectoria hacia el sub-espacio de funcionamiento normal, que corresponde a las condiciones óptimas de humectación. En este caso, se requieren estrategias de percepción y decisión más complejas para hacer frente a las no linealidades de la respuesta eléctrica de la pila PEM. Tal y como se comentó al describir el agente *ACTUALIZAR ESTADO*, si se persigue un funcionamiento autónomo en ciertas condiciones de humectación de la pila, es necesario dotar al sistema de gestión con mecanismos de gestión del grado de humectación de la pila, para evitar caer en las zonas críticas del espacio de estados.

El agente CONTROL ESTADO está dedicado a esta tarea, a partir de la respuesta del agente *ACTUALIZAR ESTADO*. De hecho, este agente permite realizar cualquier tipo de ensayo en un determinado estado de operación de la pila PEM.

- *Entradas, salidas y procesos del agente CONTROL ESTADO.*

El agente CONTROL ESTADO garantiza la operación de la pila PEM fuera de las zonas críticas de operación (estado *Inundado* y *Seco*).

Para salir de estos estados críticos de operación de la pila de combustible PEM, hacia otro estado, siguiendo los objetivos marcados, se parte del conocimiento adquirido sobre el sistema en los ensayos en lazo abierto. Se puede actuar sobre: *el tiempo de humectación*, cuanto mayor sea mayor es el contenido de agua en la pila; *temperatura de los humectadores*, cuanto mayor sea, mayor será también el contenido de agua en la pila, si el gas está humectado, y menor será el contenido de agua, si el gas no está humectado; y *caudal en cátodo*, que cuanto mayor sea, menor será el contenido de agua en la pila. En esta fase de desarrollo, el agente CONTROL ESTADO, actúa solo sobre la variable % de humectación, Capítulo 4.

El agente CONTROL ESTADO tiene como entradas: la señal de activación, desde otro agente; el estado de operación referenciado por parte del OPERADOR, en este caso el *estado normal*; la percepción en cada instante del *estado de operación* de la pila, generado por el agente *ACTUALIZAR ESTADO*; y, las señales de parada: *apagado inmediato*, en caso de fallo en el sistema, y *parada estado*, Figura 6.19. Las salidas son los valores de cambio de: temperatura en el humectador ΔT , período de humectación del gas catódico Δt_H , y caudal catódico ΔQ ; valores que se envían a los agentes de bajo nivel del sistema de gestión de pilas PEM. Puesto que se requiere la percepción del estado de operación de la pila PEM, el agente CONTROL ESTADO envía una señal de activación al agente ACTUALIZAR ESTADO, que mantiene actualizada esta variable.

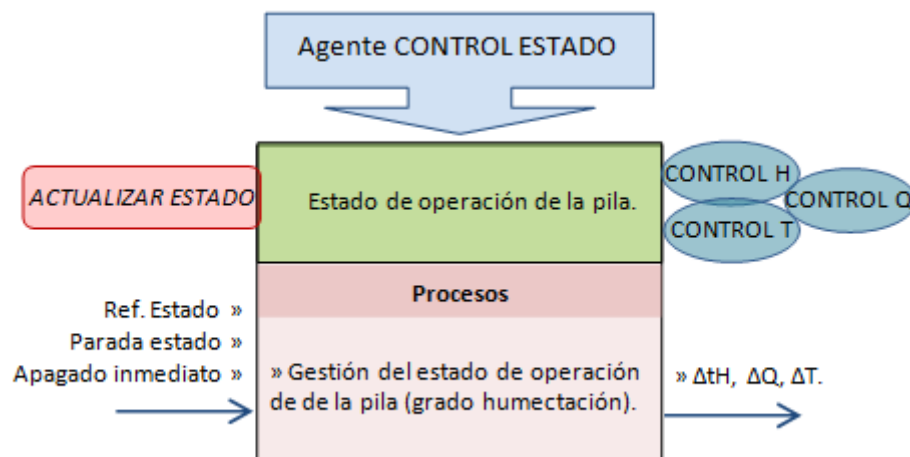


Figura 6.19 Agente de actuación CONTROL ESTADO.

- Procesos en el agente CONTROL ESTADO.

En el agente CONTROL ESTADO, se propone un sistema de control basado en técnicas de razonamiento aproximado. El desarrollo e implementación de este modelo de control para la pila de combustible garantiza la correcta consecución de los objetivos, en tiempo real, al no utilizar un modelo analítico completo del sistema. La incorporación de un *controlador borroso* en el agente CONTROL ESTADO permite abordar la imprecisión e incertidumbre inherente al sistema, formulando de manera directa, en lenguaje natural, las estrategias de control para la estimación del estado de operación de la pila PEM.

- *Modelo Cualitativo de Control*

El hecho de no poder establecer un modelo analítico preciso del sistema a controlar, por presentar un comportamiento no lineal e interacciones entre las distintas variables, dificulta el uso de técnicas de control clásico que aseguren la respuesta y estabilidad deseada, y conduce a la propuesta de un modelo cualitativo de control. El modelo cualitativo está formado por un conjunto de heurísticos que reflejan el conocimiento del experto, integrando en los conjuntos borrosos, que representan a los términos del lenguaje natural, la imprecisión e incertidumbre inherentes al sistema.

El modelo de control borroso sigue el protocolo de control utilizado por un operario experto en la caracterización de las pilas de combustible, y se formula mediante un conjunto de reglas del tipo **SI-ENTONCES**. El *antecedente* de cada regla (parte **SI**) contiene una descripción del estado de operación de la pila, y el *consecuente* (parte **ENTONCES**), la acción de control apropiada para variar el tiempo de humectación de los gases y en consecuencia el estado de la pila. De esta manera se obtiene un control continuo y robusto del contenido de agua en la pila de combustible PEM.

Para el diseño del controlador en lazo cerrado, se parte del conocimiento adquirido en lazo abierto. Las variables de entrada al controlador borroso son:

- *Estado de Referencia*, en este caso el estado *Normal*.
- *Estado de operación* estimado cada cierto intervalo de tiempo.

La variable de salida del controlador se corresponde al tiempo de humectación [tH] al que estarán sometidos los gases que se inyectan a la pila, proporcional a la anchura del pulso PWM de actuación sobre la electroválvula. La Figura 6.20 muestra el controlador borroso en lazo cerrado diseñado para el control de estado.

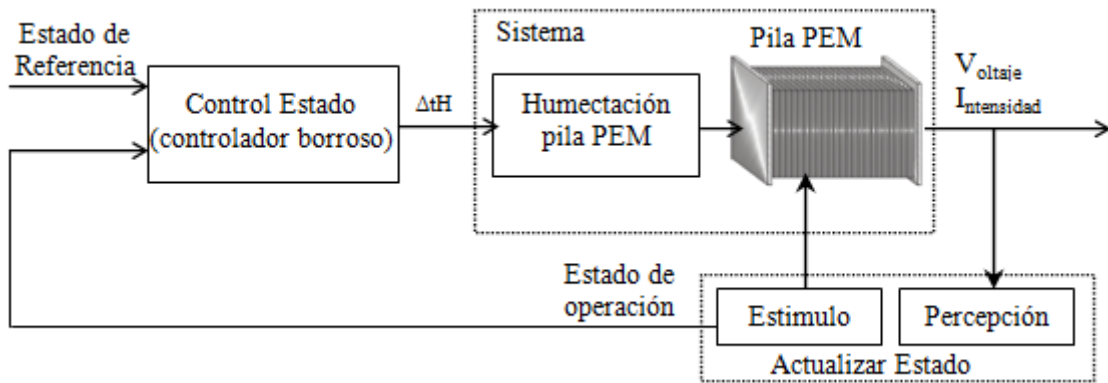


Figura 6.20 Esquema del controlador borroso de estado de la pila.

- *Mecanismos de Decisión*

Las variables de entrada al controlador borroso son: *estado de operación*, determinado por el agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO* y la variable *estado de referencia*. Ambas se describen mediante cinco términos lingüísticos (conjuntos borrosos), definidos por funciones de pertenencia trapezoidales (*proceso de borrosificación*) {*S (seco)*, *LS (ligeramente seco)*, *N (normal)*, *LI (ligeramente inundado)* e *I (inundado)*}, y se corresponden con el valor borroso del estado de operación de la pila PEM.

La variable de salida: *tiempo de humectación* está definida mediante cinco términos lingüísticos (conjuntos borrosos) {*NH*, *PH*, *BH*, *MH*, *AH*}, definidos también por funciones de pertenencia trapezoidales, Figura 6.21.

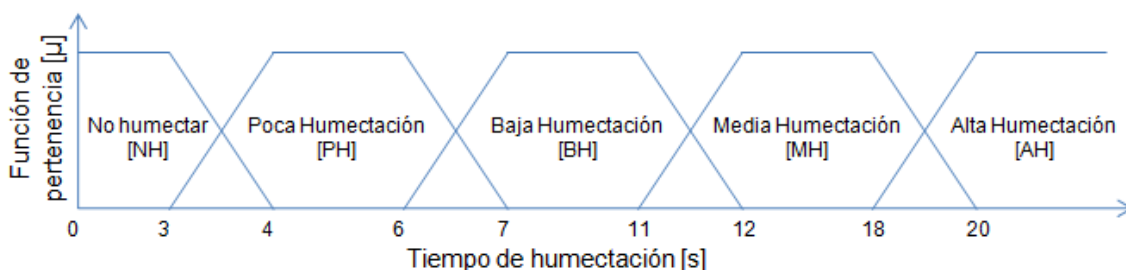


Figura 6.21 Variable de salida del controlador borroso, tiempo de humectación.

El conjunto de reglas borrosas (*Base de Reglas*) que se han seleccionado como buenos descriptores del funcionamiento del sistema, es el siguiente:

- R1: **IF** (*estado de operación* = S **AND** *estado de referencia* = N) **THEN** AH
- R2: **IF** (*estado de operación* = LS **AND** *estado de referencia* = N) **THEN** MH
- R3: **IF** (*estado de operación* = N **AND** *estado de referencia* = N) **THEN** BH
- R4: **IF** (*estado de operación* = LI **AND** *estado de referencia* = N) **THEN** PH
- R5: **IF** (*estado de operación* = I **AND** *estado de referencia* = N) **THEN** NH

La acción neta de control, cambio en el tiempo de humectación [ΔtH], se obtiene a partir de la expresión del centro de masas, [Klir G.J. y B. Yuan, 1995], Figura 6.22.

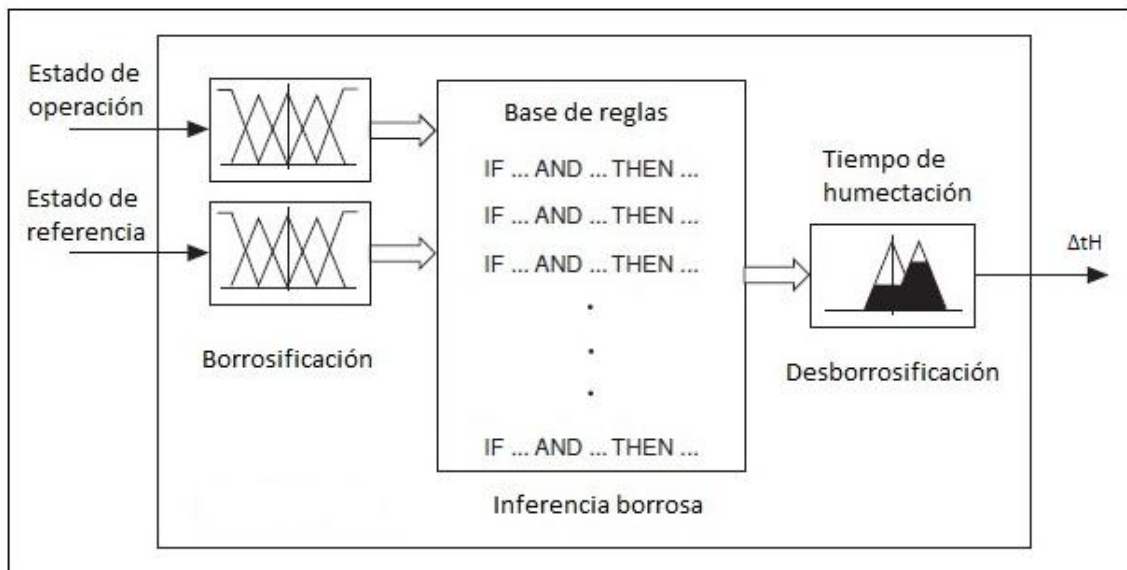


Figura 6.22 Estructura interna del controlador borroso.

Tal y como se muestra en el diagrama de flujo de información del agente CONTROL ESTADO, Figura 6.23, una vez que éste recibe la señal de activación y pasa del estado **inactivo** al estado **alerta**, comprueba la existencia de fallos o parada de estado. A continuación, envía la señal de activación al agente *ACTUALIZAR ESTADO* y ejecuta las rutinas de iniciación propias, apertura del fichero de texto con la base de reglas del controlador y enlace de variables. Una vez que el agente *ACTUALIZAR ESTADO* finaliza su ejecución y actualiza la variable estado de operación, el agente CONTROL ESTADO pasa al estado **activo**, ejecutando así el algoritmo de control implementado y enviando al controlador de bajo nivel el cambio del tiempo de humectación correspondiente.

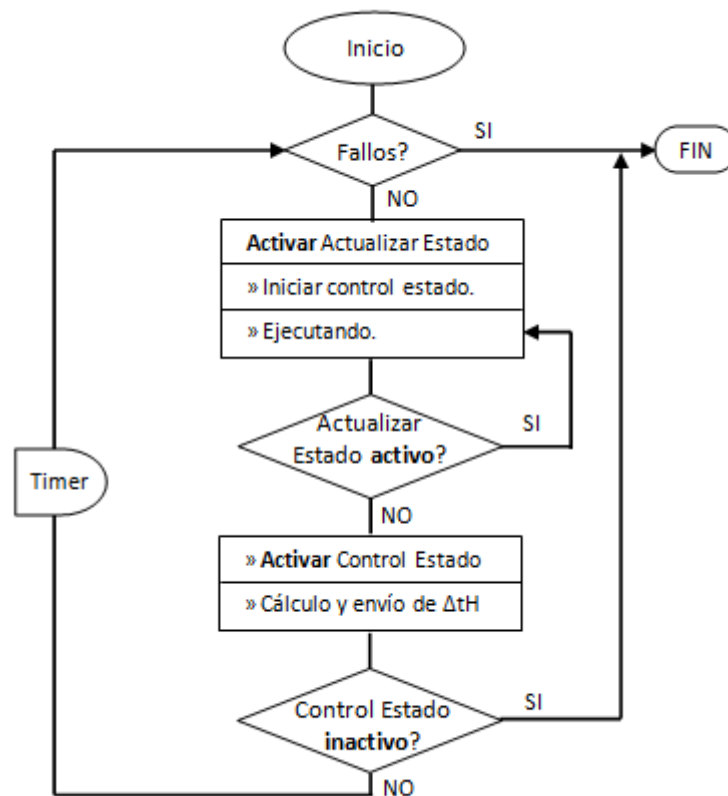


Figura 6.23 Diagrama de flujo de información del agente CONTROL ESTADO.

▪ Agente CONFIGURAR.

El agente CONFIGURAR es el responsable del funcionamiento autónomo de la pila PEM en condiciones óptimas de humectación (*estado Normal*), es decir, de realizar la gestión de procesos que conduce al funcionamiento seguro, autónomo y en condiciones estables de humectación de la pila, bajo unas condiciones iniciales preestablecidas por OPERADOR, como: *umbrales de operación*, que dependen del área de la pila, *tipo de escenario* o aplicación a la cual la pila debe suministrar energía, *condiciones de operación* (variables de estado), y *grado de humectación* de la pila.

Por ello, el agente CONFIGURAR dispone de una interfaz de usuario que permite definir las condiciones iniciales de operación.

Para llevar a cabo estas tareas el agente CONFIGURAR en una determinada secuencia envía señales de activación a los agentes de actuación:

- GESTIONAR ALERTA, para asegurar un funcionamiento seguro de la pila y de la instalación
- CONTROL ESTADO para mantener el punto de operación de la pila de combustible alejado de los estados críticos. Por defecto en esta fase de desarrollo se selecciona como estado de operación objetivo el *estado normal*, con óptima de humectación.
- CONTROL RENDIMIENTO y CALCULAR CURVA V-I, para generar diversos comportamientos en la respuesta eléctrica de la pila dependiendo del tipo de escenario seleccionado.

Las salidas del agente CONFIGURAR corresponden a las referencias iniciales de trabajo de la pila definidas por el OPERADOR: *umbrales* para cada tipo de pila, que a su vez constituyen las entradas al agente *PERCIBIR ALERTA*; *referencias* de las variables de estado, que corresponden a las entradas de los agentes de actuación de bajo nivel embebidos en la red de microprocesadores; *referencias* de estado y del tipo de aplicación (escenario) de carga eléctrica, a su vez entradas de los agentes CONTROL ESTADO, CALCULAR CURVA V-I y CONTROL RENDIMIENTO, respectivamente; y las *señales de activación* a los agentes implicados, Figura 6.24.

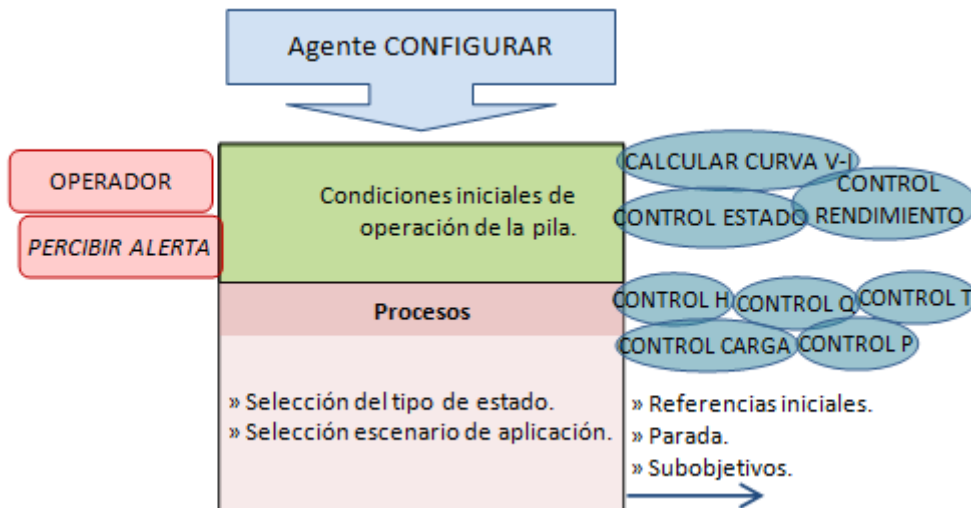


Figura 6.24 Agente de actuación CONFIGURAR.

Una vez completadas las inicializaciones de configuración del escenario o aplicación, y de las condiciones de operación y siempre que el agente CONFIGURAR se mantenga en estado **activo** o **alerta**, se inician los procesos de forma iterativa.

En primer lugar, se comprueba si no existe ningún tipo de fallos: parada por fin de proceso (experimento) o parada general de la pila, analizando la señal *apagado inmediato* generada por el agente PARADA AUTOMÁTICA. Si es así, se espera un tiempo para asegurar que todas las variables de operación y escenarios de carga se encuentren a cero y luego se finaliza el proceso. Si no hay fallos ni paradas, se procede a verificar la condición de activación del tipo de escenario eléctrico configurado, para finalizar verificando si la condición de activación del agente CONTROL ESTADO se cumple. Al llegar a este punto, se espera el tiempo de ciclo correspondiente y se inicia la siguiente iteración. Figura 6.25.

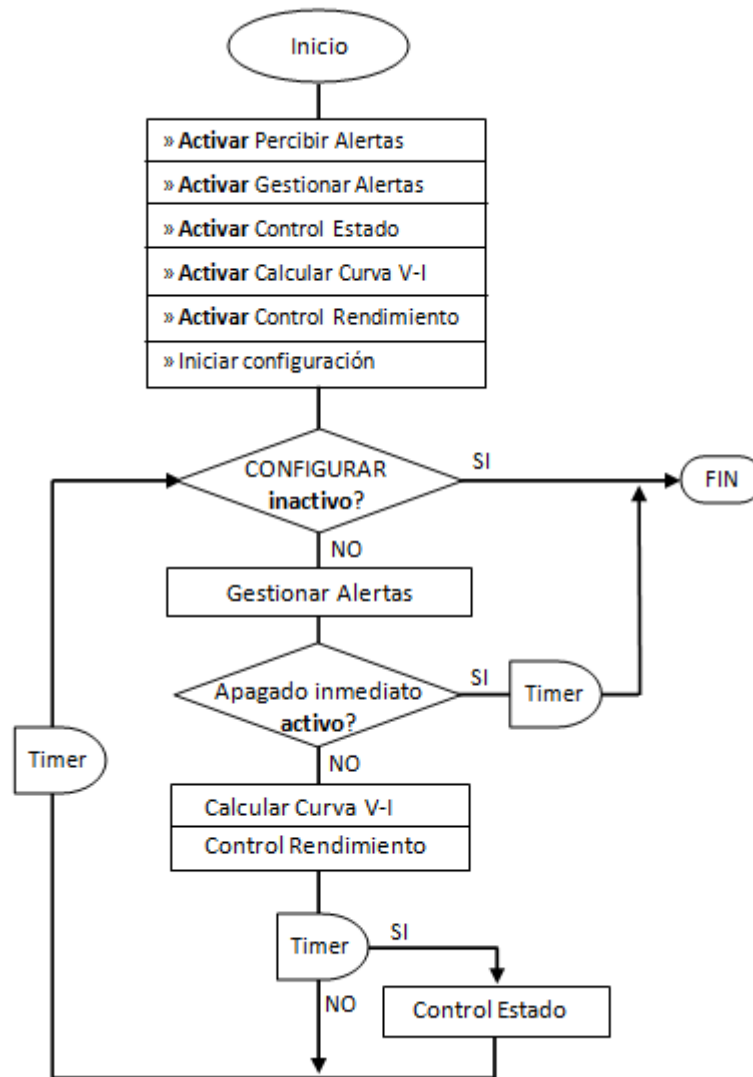


Figura 6.25 Diagrama de flujo de información del agente CONFIGURAR.

6.4. Resultados en el control de la pila PEM

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos con la arquitectura de agentes expertos propuesta en este trabajo, para el funcionamiento autónomo de pilas PEM, en condiciones óptimas de humectación.

En esta sección se demuestra que el sistema *hardware/software* que subyace a la arquitectura de percepción y control propuesta, combina el control de bajo nivel, mediante controladores PID de variable única, con un control multivariable borroso y clásico de nivel superior, para detectar en tiempo real el estado de la pila PEM (agente *ACTUALIZAR ESTADO*) y conducirla al estado definido como óptimo (agente *CONTROL ESTADO*), en función de la aplicación que se vaya a dar a la pila PEM (agentes: *CALCULAR CURVA V-I* y *CONTROL RENDIMIENTO*) y atendiendo siempre a posibles fallos (agente *GESTIONAR ALERTAS*).

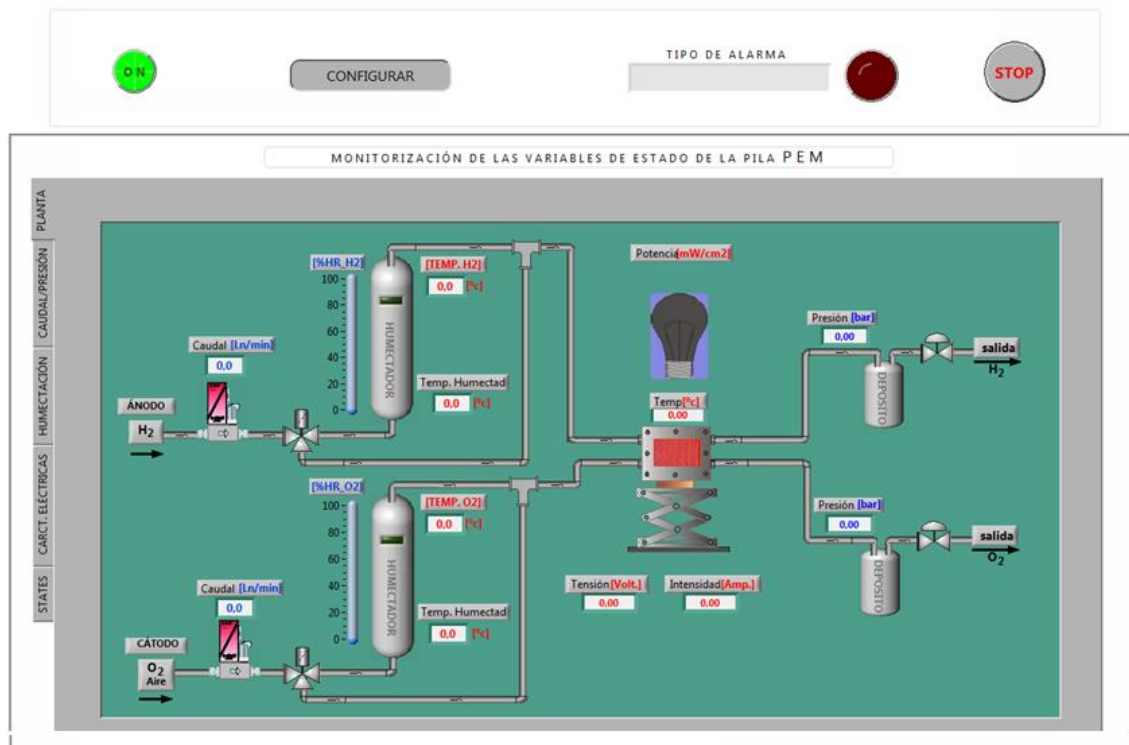


Figura 6.26 Interfaz de usuario del agente MONITORIZAR.

La aplicación desarrollada para la operación autónoma de la pila PEM, permite generar diversos comportamientos en la respuesta eléctrica de la pila, en diferentes condiciones de operación. Presenta dos tipos de funcionalidad:

- Modo experimentación, para realizar pruebas iniciales de forma manual.
- Modo autónomo, para la supervisión y control desatendido de la pila.

La aplicación de propósito general desarrollada consta de un interfaz de usuario, donde se configuran los distintos parámetros de las pilas y escenarios, se visualizan las variables y se ejecutan los diferentes **agentes** involucrados en la aplicación. En la etapa actual, la aplicación MONITORIZAR, cuya ventana principal aparece en la Figura 6.26, permite al OPERADOR navegar por varias ventanas cuyo menú de selección está ubicado en el lateral izquierdo. Estas ventanas son solo de monitorización y muestran la evolución temporal de las variables de estado de la pila PEM. En los extremos opuestos de la zona superior, Figura 6.26, aparecen dos indicadores luminosos: el *verde* indica que se está ejecutando la aplicación correctamente, mientras que el *rojo* marca la existencia de un fallo y el tipo de fallo, en la ventana de texto. De igual manera, existen dos botoneras en la parte superior para:

- Configurar, que muestra la interface del agente CONFIGURAR.
- STOP, para realizar un paro general del funcionamiento de la pila de combustible.

6.4.1. Resultados en tareas de caracterización

El objetivo de la aplicación para la *caracterización* de la pila de combustible PEM, es el siguiente, dados:

- Unos umbrales de protección, intervalos de operación de las variables de estado.
- Unas condiciones iniciales de operación, referencias de las variables de estado.
- Escenario de carga a aplicar a la pila PEM, constante o variable.
- El estado de operación objetivo.

Se trata de conseguir que el sistema de gestión de la pila, realice los experimentos programados por el operario de manera segura y autónoma.



Figura 6.27 Interfaz de usuario del agente CONFIGURAR en modo experimentación.

La aplicación responsable de la configuración del experimento y ejecución de los procesos, corresponde al agente CONFIGURAR. Esta aplicación con interface permite al OPERADOR introducir manualmente los umbrales, referencias de operación de la pila, tipo de carga eléctrica a aplicar y el estado objetivo, al presionar CONFIGURAR, zona superior izquierda de la Figura 6.26.

Una vez establecidas las condiciones iniciales por el OPERADOR y dada la señal de inicio, la ventana se cierra, y el agente CONFIGURAR inicia la secuencia de ejecución de los agentes de la aplicación, y estos a su vez la secuencia de procesos y verificaciones correspondientes a los procesos embebidos en los mismos. La ventana principal del agente CONFIGURAR, Figura 6.27, consta de dos sub-ventanas: la de la izquierda, se corresponde con *umbrales*, *referencias* y *estado de la pila PEM* que el OPERADOR introduce manualmente, y la de la derecha, para los parámetros de control del tipo de aplicación (escenario), CALCULAR CURVA V-I.

▪ Resultados Experimentales: Curva V-I.

La curva de polarización o curva V-I expresa la tensión en función de la corriente de la pila de combustible cuando se le aplican distintos valores de carga, este modelo experimental proporciona información muy valiosa de los parámetros electroquímicos de la pila, de ahí su importancia en el estudio de las pilas de combustible.

Los resultados que se presentan a continuación, muestran el comportamiento eléctrico de la pila PEM, para una monocelda y una pila (pequeño stack), ante variaciones de carga.

Los ensayos se iniciaron con una monocelda PEM, AL_N2_P2, con electrodos de tela de carbón catalizados con platino, 0.58 mg Pt/cm^2 , y un área activa de 5 cm^2 . El montaje se realizó con dos tipos de sellos, uno de silicona (1mm) y otro más fino de teflón (0.2mm) para cubrir el espesor de la zona central (MEA y las placas bipolares corrugadas). De este modo las placas bipolares no quedan presionadas sobre el electrodo y no pierden la parte corrugada. La Tabla 6.2 presenta los distintos componentes de la pila PEM, a caracterizar mediante la curva de polarización V-I. El orden descendente en la Tabla 6.2 corresponde al de montaje.

Tabla 6.2. Componentes de la monocelda PEM, AL_N2_P2

| Material | Grosor (mm) | (mm) | (mm) |
|--|--------------------|-------------|-------------|
| Sello Silicona | 1 | | 1,4 |
| Sello fino | 0,2 | | |
| Sello fino | 0,2 | | |
| P. bipolar corrugada de Aluminio Pasivado tipo 1 | 1 | 2,85 | |
| Electrodo | 0,4 | | |
| Membrana Nafion 112 | 0,05 | | |
| Electrodo | 0,4 | | |
| P. bipolar corrugada de Aluminio Pasivado tipo 1 | 1 | | |
| Sello fino | 0,2 | | 1,4 |
| Sello fino | 0,2 | | |
| Sello Silicona | 1 | | |

Las placas bipolares están construidas con láminas de aluminio pasivado de 0.1 mm para dar mayor durabilidad a las placas.

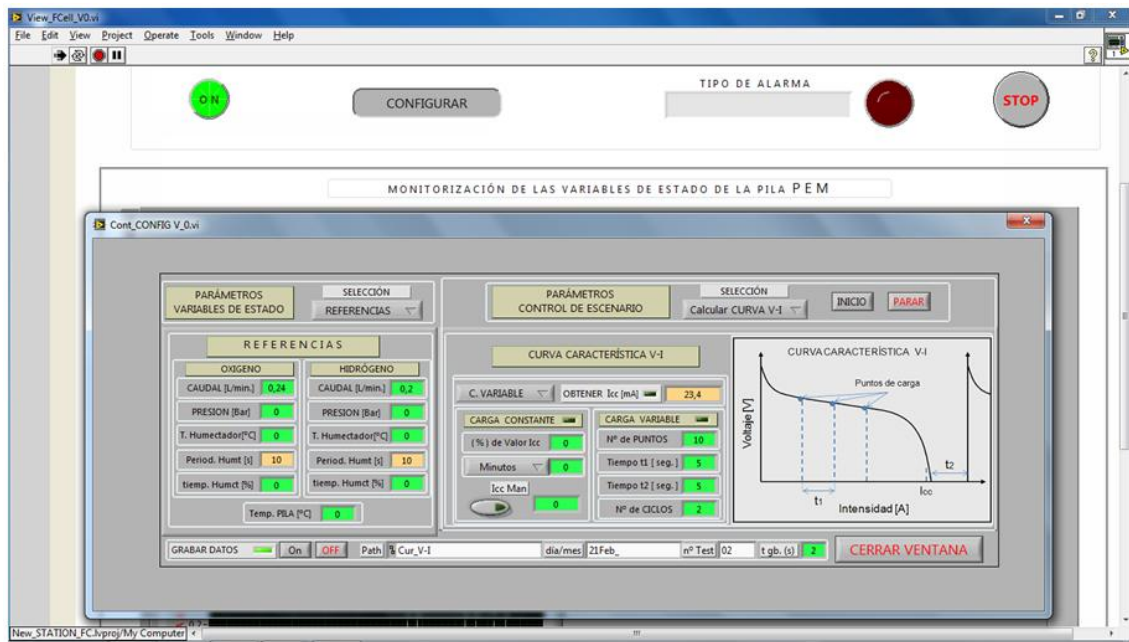


Figura 6.28 Condiciones iniciales fijadas por el usuario en el interfaz del agente CONFIGURAR.

Las condiciones iniciales fijadas para las variables de estado de la pila PEM se muestran en la Figura 6.28. Como se puede observar en la ventana de configuración, se ha seleccionado como tipo de escenario Carga Variable, con 10 puntos de cambios de carga secuencial sobre la curva V-I, esto es, sobre el valor de la corriente de cortocircuito I_{cc} .

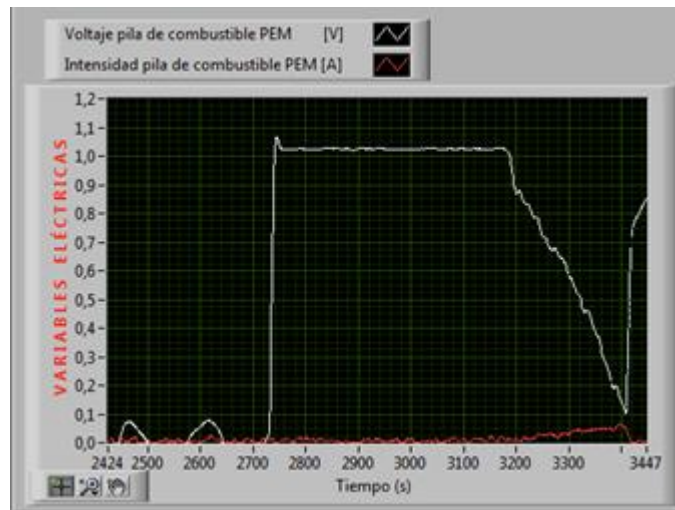


Figura 6.29 Evolución temporal del voltaje y corriente en el proceso de obtención del valor de I_{cc} .

Una vez iniciado el ensayo, se activan los agentes implicados, ACTUALIZAR ALERTA, GESTIONAR ALERTA y CALCULAR CURVA V-I. El agente CALCULAR CURVA V-I procede a realizar un barrido de carga para determinar el valor de I_{cc} , Figura 6.29. La figura

muestra la evolución temporal del voltaje de la monocelda PEM durante el barrido de carga y el valor de la corriente. El agente CALCULAR CURVA V-I después de un período de estabilización de la pila, calcula la curva V-I con los parámetros de configuración, Figura 6.30.

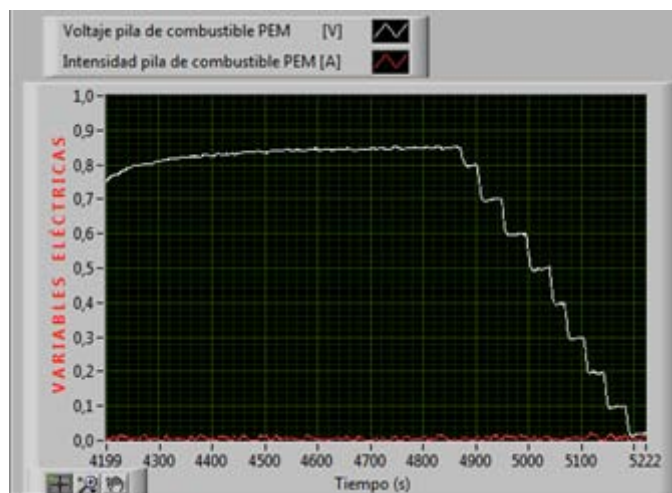


Figura 6.30 Evolución temporal del voltaje y corriente para el cálculo de la curva V-I.

Durante el proceso de caracterización, los valores medidos de las variables de estado y respuesta eléctrica de la pila se almacenan para su posterior análisis.

Se realizaron ensayos de obtención de la curva V-I, con más puntos sobre la curva de polarización, con la misma monocelda y una pila (pequeño stack). La pila P 18, consta de 18 monoceldas, distribuidas en dos columnas de 9 monoceldas cada una. Los circuitos exteriores se encuentran conectados en serie de tal forma que los potenciales de cada monocelda se suman. Los materiales y dimensiones de los componentes de la pila P 18 son los siguientes:

- Membrana: Nafion. Altura = 27cm, Ancho = 17,5cm, Espesor = 178 μ m. Ánodo/Cátodo: compuestos de tela de carbón con platino depositado. Superficie de 75x20 mm².
- Aislante: dos capas de silicona de 1mm de espesor y un sello de Teflón de 0,22mm.
- Placas bipolares: laminas corrugadas de acero. Superficie de 75x20mm², con espesor antes de corrugar 0,10mm y después de corrugar de 1,14mm entre picos.
- Placas exteriores: 2 placas de Metacrilato, de 30x20 cm² de superficie y espesor 2cm.

La Tabla 6.3 muestra los valores iniciales de las variables de estado implicadas, para cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 6.3. Valores de las variables de estado en el cálculo de la curva V-I.

| Condiciones iniciales | Q _{ca} O ₂ (L/min) | Q _a H ₂ (L/min) | T. H _{umect.} (°C) | Carga Variable |
|-----------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|----------------|
|-----------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|----------------|

| | | | | |
|-----------------|------|------|-------|----|
| Monocelda | 0.23 | 0.15 | T.amb | SI |
| Stack (ensayo1) | 0.23 | 0.15 | T.amb | SI |
| Stack (ensayo2) | 0.6 | 0.45 | T.amb | SI |

La Figura 6.31 para la Monocelda, y la Figura 6.32 para la pila P 18, muestran los resultados de la ejecución del agente CALCULAR CURVA V-I de forma autónoma, dadas unas condiciones iniciales en las variables de estado.

La Figura 6.31 muestra tanto la curva de polarización Tensión-Corriente, curva V-I, como la curva de la potencia eléctrica generada por la monocelda PEM. Esta última obtenida a partir de los datos almacenados por el agente MONITORIZAR.

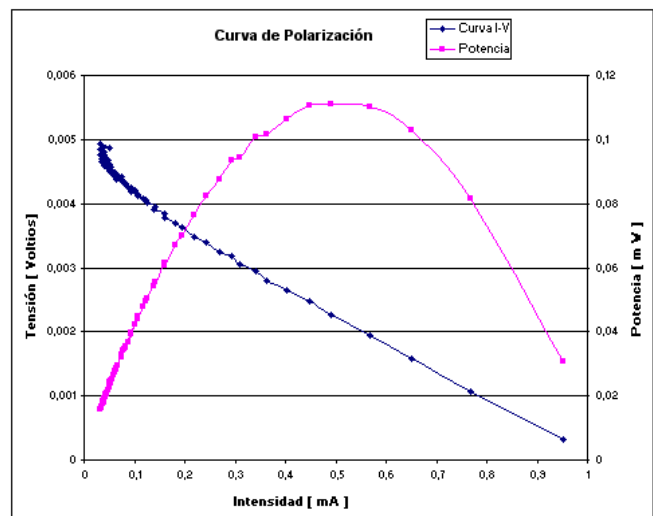


Figura 6.31 Curva de polarización V-I y de potencia de la monocelda AL_N2_P2.

En la Figura 6.32 se presentan las curvas V-I para dos ensayos con la pila P18. El ensayo 1 muestra menor generación de energía eléctrica que el ensayo 2, la diferencia se debe al valor de caudal anódico y catódico inyectado a la pila P18. En el ensayo 1 no había suficiente combustible para alimentar a todas las monoceldas del stack, mientras que en el ensayo 2 se incrementó el combustible, y la pila genera más energía eléctrica.

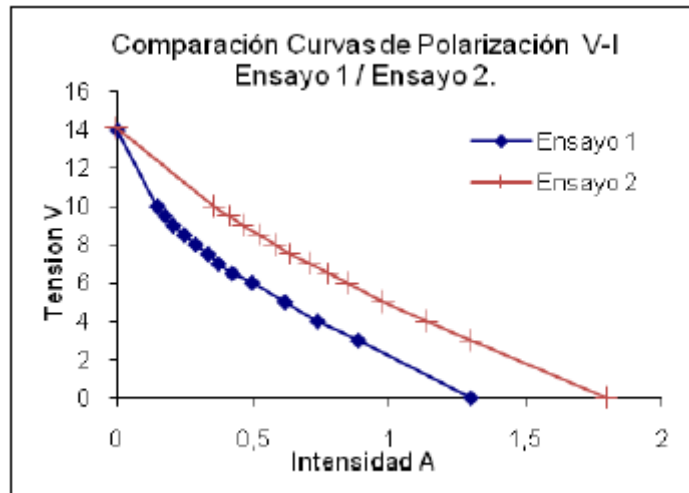


Figura 6.32 Curva de polarización V-I de la pila P 18 en dos ensayos con diferente caudal.

6.4.2. Experimentos en tareas de control de estado

El objetivo de la aplicación en tareas de *detección y control de estado* de la pila de combustible PEM, es llevar de forma autónoma el punto de operación de la pila a las condiciones óptimas de operación, *espacio de estado*, donde se obtienen los mejores rendimientos de generación eléctrica por parte de la pila de combustible, en las condiciones óptimas de humectación de la membrana. Con ello se consigue alargar la vida útil de los componentes de la pila PEM, en especial de la membrana y de los catalizadores. Se persigue alcanzar los objetivos, partiendo de unas condiciones iniciales de operación:

- Umbrales de protección.
- Referencias iniciales de las variables de estado.
- Escenario de carga a aplicar a la pila PEM,
- Estado de operación objetivo.

La aplicación del agente de actuación CONFIGURAR permite llevar a cabo este tipo de tarea perceptiva y de actuación sobre el punto de operación de la pila PEM, Figura 6.33. Dadas las condiciones iniciales de operación, se persigue que el sistema de gestión de la pila alcance el estado de operación *Normal*, condiciones óptimas de humectación de la membrana, desde cualquier otro estado de operación de forma segura y autónoma.



Figura 6.33 Condiciones iniciales de Control de estado fijadas por el usuario en el agente CONFIGURAR.

En la zona izquierda de la Figura 6.33, se configura la variable, *estado de operación*, y se selecciona el *estado de referencia*: {Seco, Ligeramente Seco, Normal, Ligeramente Inundado e Inundado}, mediante etiquetas lingüísticas. En una sub-ventana de texto, se indica el estado de operación de la pila de combustible.

- Resultados Experimentales: Detección y control de estado.

Para realizar los ensayos de detección y control de estado se utilizó una monocelda tipo PEM de igual área activa y montaje que las pilas descritas en el Capítulo 3.

La pila de combustible empleada es una Al_N2_P2, con área activa de 5 cm², y con una proporción de catalizador en los electrodos, 0.59 mg Pt/cm², Aluminio pasivado tipo 2.

Antes de iniciar las pruebas de control de estado, se inyecta nitrógeno sin humectar en ambos electrodos de la pila de combustible, esto es modo simétrico:

- $Q_a [N_2] / Q_{ca} [N_2] = 0.22 \text{ L/min.}$

La inyección de nitrógeno tiene dos objetivos: a) realizar una limpieza de los canales internos de la pila; y b) forzar a que la pila PEM se encuentre, en el inicio, en uno de los estados críticos de operación, en este caso, asegurar el estado *Seco*.

Después del proceso de secado de la pila con nitrógeno, se introducen las condiciones iniciales de operación de la pila PEM, a través del interfaz de usuario del agente CONFIGURAR. La Tabla 6.4 muestra los valores de las variables de estado, tipo de escenario y referencia de estado para la experimentación con el agente CONTROL ESTADO.

Tabla 6.4. Condiciones iniciales de operación de la pila con el agente CONTROL ESTADO.

| Condiciones iniciales | $Q_{ca} O_2$ (L/min) | $Q_a H_2$ (L/min) | T. $H_{umect.}$ (°C) | tiempo humectación | Carga Variable | Ref. estado |
|-----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------|-------------|
| Monocelda Al N2 P2 | 0.22 | 0.15 | T.amb | 0% | SI | NORMAL |

Se procede a la ejecución del agente CALCULAR CURVA V-I y un solo ciclo de curva. Con ello se obtiene una visión global de cómo la respuesta eléctrica de la pila PEM mejora a medida que el controlador borroso actúa sobre la variable tiempo de humectación en el gas inyectado, siguiendo el modelo de control cualitativo formulado en la Base de Reglas, Figura 6.21.

El agente CONTROL ESTADO pasa al estado **activo** cada 40 min. La razón de utilizar este tiempo y no el de una hora, utilizado en el proceso de secado a la pila PEM Capítulo 3, obedece al hecho de que el control de estado de la pila opera en *modo asimétrico*, lo que implica la producción de una pequeña cantidad de agua debido a la reacción electroquímica. Introducidas las condiciones iniciales de configuración por parte del OPERADOR y dada la señal de inicio *control de estado*, se activan los agentes ACTUALIZAR ALERTA, GESTIONAR ALERTA, CALCULAR CURVA V-I y CONTROL ESTADO para llevar a cabo con éxito la operación de la pila PEM, en condiciones de humectación óptimas.

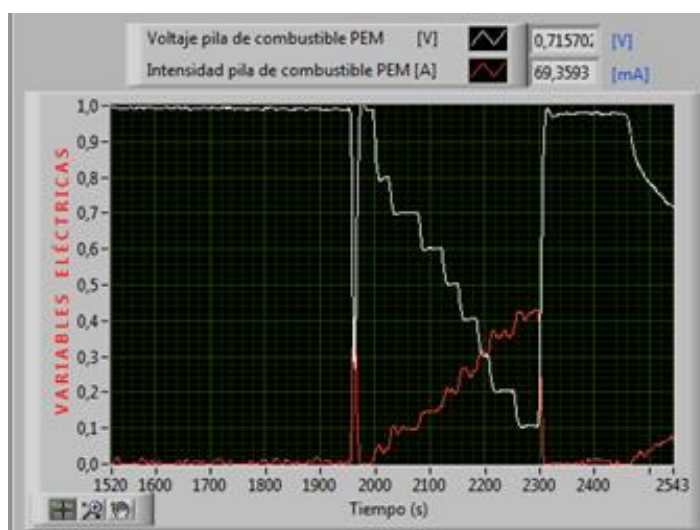


Figura 6.34 Evolución temporal del voltaje y corriente en el cálculo de I_{cc} y curva V-I.

Si no hay ningún fallo de operación, parada de emergencia o parada de ensayo, se procede a ejecutar el agente CALCULAR CURVA V-I. El procedimiento es similar al descrito en el apartado 6.5.1 de este capítulo. Como se puede observar en la gráfica representada en la Figura 6.34, el voltaje en circuito abierto de la pila es de aproximadamente 0,97 V. Cuando se **activa** el agente CALCULAR CURVA V-I, se procede a realizar el barrido de carga para obtener el valor de I_{cc} . En la Figura 6.34, este barrido lo representa la primera caída de tensión de la pila. A continuación, se espera un corto período de tiempo en circuito abierto (sin aplicar carga) para conseguir la recuperación de la pila, y se procede a realizar el barrido de carga con los tiempos de configuración para el cálculo de la curva V-I, secuencia de caídas tipo escalón del voltaje generado por la pila, Figura 6.34.

Una vez determinada la curva V-I, se espera de nuevo un período de tiempo de recuperación de la pila, y a continuación se **activa** el agente CONTROL ESTADO, iniciándose con ello la activación del agente perceptivo ACTUALIZAR ESTADO, Figura 6.35.

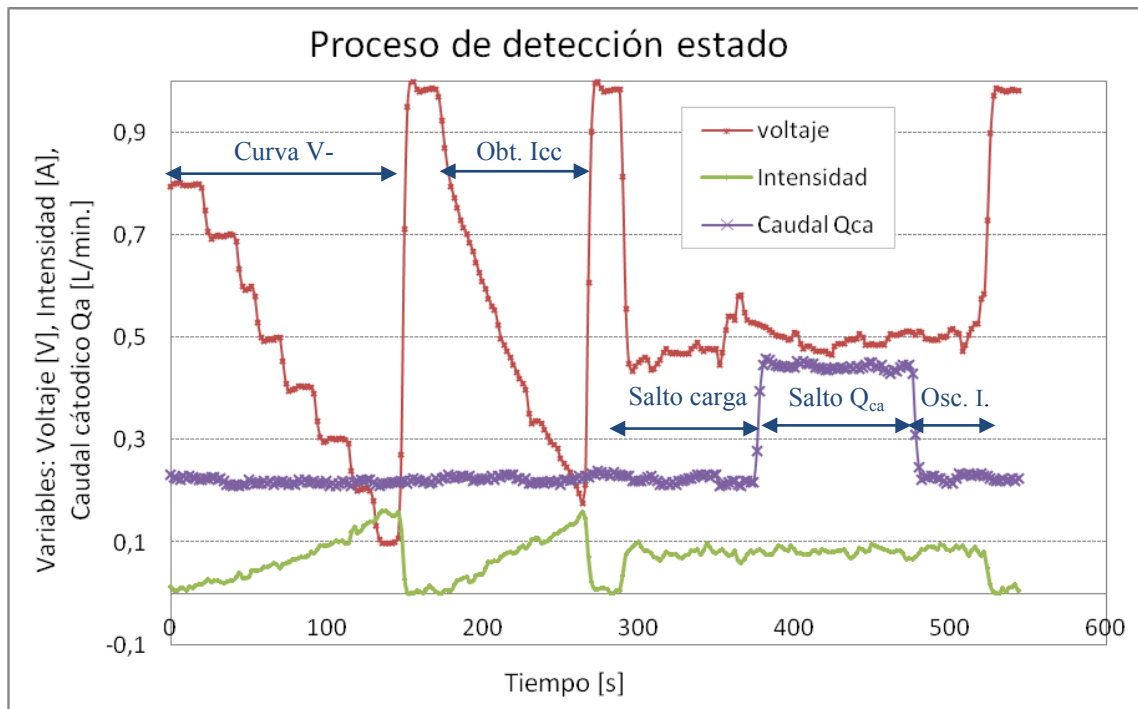


Figura 6.35 Evolución temporal del caudal y las variables eléctricas de la pila en el proceso de detección de estado.

La Figura 6.35, muestra la evolución temporal de las variables eléctricas generadas por la pila de combustible (voltaje e intensidad) y caudal catódico inyectado a la pila durante la ejecución del agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO*. Una vez que el agente perceptivo pasa al estado **activo**, este procede a **activar** al agente de actuación *GENERAR PERTURBACIÓN*, quién se inicia realizando un barrido de carga para determinar el valor de la corriente de cortocircuito I_{cc} . En el agente de actuación el valor de I_{cc} es el punto de partida para aplicar las perturbaciones (estímulos): *salto de carga*, *salto de caudal* y *oscilación de intensidad*, para la estimación de estado. Tal y como se muestra en la Figura 6.35, una vez obtenido de valor de I_{cc} para la estimación de estado, se espera un corto período de tiempo de recuperación de la pila y a continuación se procede a aplicar a la pila el valor de carga correspondiente a $I_{cc}/2$ durante el tiempo de aplicación de la perturbación, aproximadamente 6 minutos.

El primer estímulo a aplicar es el *salto de carga*, seguido del *salto de caudal catódico*, el doble del caudal de referencia, y finalmente, la *oscilación de intensidad*. A continuación se procede al cálculo de los parámetros característicos de estado: *cambio de pendiente*, *amplitud de voltaje* y *diferencia de tensión*, que constituyen las entradas del agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO*. Este último, a partir del el árbol de decisión borroso estima el estado actual de operación de la pila PEM. El tiempo aproximado de ejecución del agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO*, es 7 min. El agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO* se ejecuta cada vez que el agente de actuación *CONTROL ESTADO* lo demanda.

El agente *CONTROL ESTADO*, a partir del estado actual de operación de la pila PEM generado por el agente perceptivo *ACTUALIZAR ESTADO*, procede a determinar el valor de

la acción de control, tiempo de humectación del gas inyectado a la pila PEM. En la Figura 6.36 se comparan las distintas curvas de polarización V-I obtenidas en cada ciclo de ejecución del agente CONTROL ESTADO.

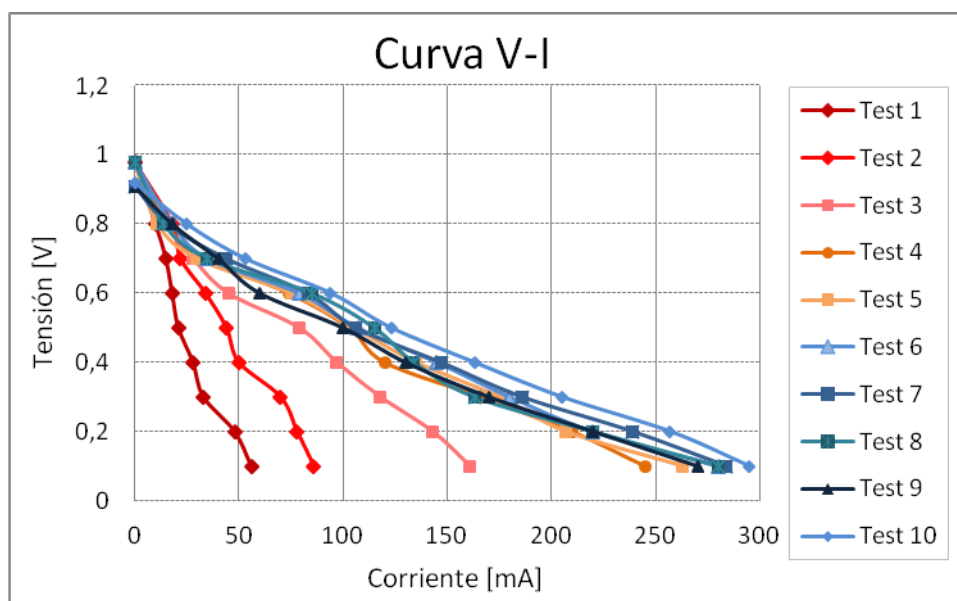


Figura 6.36 Evolución de la curva V-I de la pila PEM en el proceso de control de estado.

Como se comentó al inicio de la experimentación en tareas de *detección y control* de estado de la pila PEM, se parte de la condición de *estado Seco* de la pila de combustible. Esta condición se refleja en la curva de polarización correspondiente al Test_1 en la Figura 6.36. Se puede observar un bajo rendimiento eléctrico de la pila PEM, pues la corriente máxima que entrega la pila en estas condiciones es 60 mA. Sin embargo, a medida que se introduce el gas humidificado, con un tiempo de humectación del 100%, lo que corresponde a la válvula de humectación totalmente abierta durante todo el tiempo que transcurre hasta la siguiente ejecución del agente Control Estado. En esta condición se observa claramente mejoras en la respuesta eléctrica de la pila PEM, Test_2 de la Figura 6.36. Una vez que la pila alcanza las condiciones óptimas de generación de energía eléctrica, la separación entre curvas V-I consecutivas es cada vez menor, lo que indica que el controlador introduce variaciones más pequeñas en el tiempo de humectación, a medida que se acerca al valor de referencia, *estado Normal*.

En la curva V-I correspondiente al Test_9, se observa una caída en las prestaciones eléctricas de la pila PEM. Esta caída en el voltaje generado por la pila se debe a que el punto de operación de la pila está pasando del estado estable de humectación, *estado Normal*, al estado *Ligeramente Inundado*. Aunque en el Test_10 de la Figura 6.36, se observa una recuperación del comportamiento eléctrico de la pila, esto probablemente se debe a la perturbación de *salto de caudal*, al inyectar el gas con un tiempo corto de humectación. En estas condiciones al provocar un *salto de caudal* de duración dos minutos, el caudal catódico arrastra el agua de la pila, y por ello se produce una recuperación de la respuesta eléctrica, lo que obliga a reducir el tiempo de la perturbación *salto de caudal*.

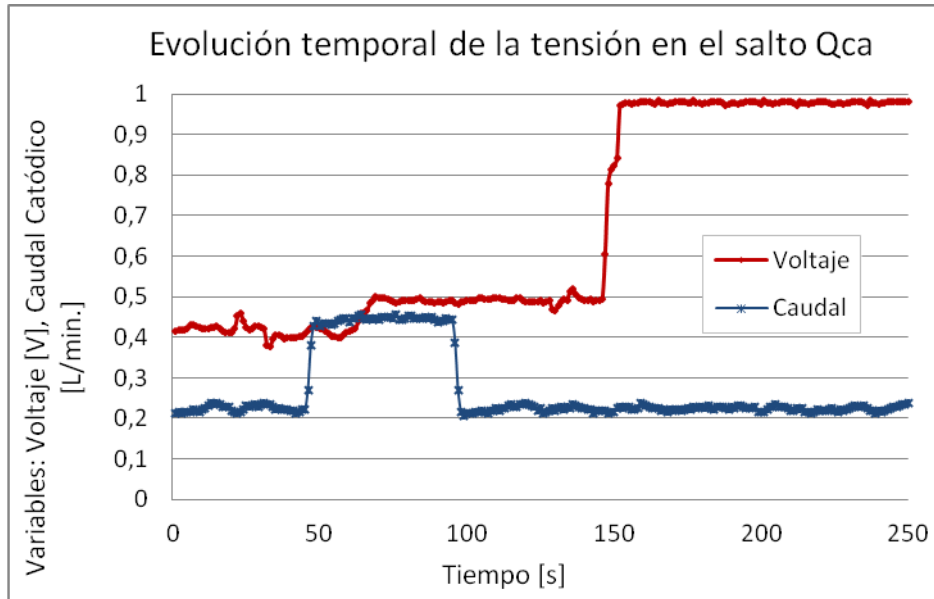


Figura 6.37 Evolución temporal de la tensión generada por la pila PEM durante la perturbación salto de caudal.

La evolución temporal del voltaje que se presenta en la Figura 6.37, muestra una clara recuperación, después de aplicar el salto de caudal catódico a la pila de combustible. Esto confirma el arrastre del agua en la pila por parte del caudal inyectado a la misma. Una vez finalizada la aplicación de la perturbación, el caudal vuelve al valor de referencia, sin embargo la tensión de la pila se mantiene, indicando su buen estado de operación. Finalmente, el voltaje de la pila vuelve a valores de circuito abierto lo que confirma el final de ejecución del agente GENERAR PERTURBACIÓN.

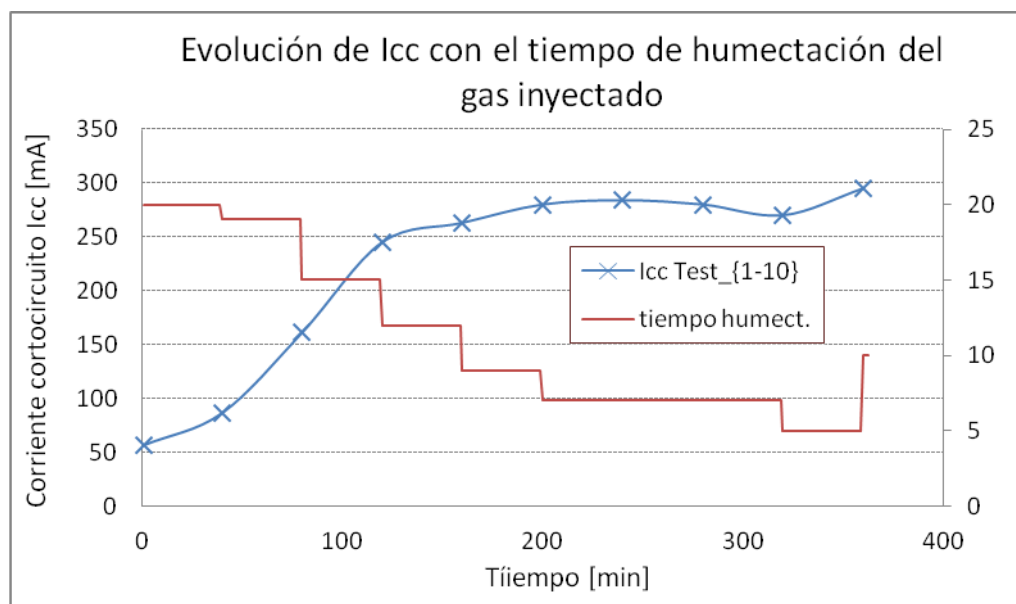


Figura 6.38 Evolución de la corriente de cortocircuito I_{cc} durante la ejecución del agente CONTROL ESTADO.

La Figura 6.38 presenta la evolución temporal de la corriente de cortocircuito I_{cc} de la pila PEM, curva color azul, instantes antes de cada ciclo de ejecución del agente CONTROL ESTADO, concretamente muestra los valores de I_{cc} de cada uno de los Test de cálculo de las curvas de polarización mostradas en la Figura 6.36. En la Figura 6.38 se observa una clara mejoría en la respuesta eléctrica de la pila a medida que aumenta el grado de humectación en la membrana, lo que confirma que el punto de operación de la pila PEM se aleja del *estado Seco*, estado de partida, Test_1.

También se observa la evolución de la variable de estado “*tiempo de humectación*” de los gases inyectados a la pila PEM, curva color rojo. El tiempo de humectación se inicia con un valor máximo de 20 s, lo que se traduce en una apertura de la válvula. A medida que la pila va adquiriendo mayor grado de humectación el valor del período de humectación va disminuyendo, pues se inyecta el gas con menos humedad relativa. Al final se observa una caída en la variable I_{cc} , lo que indica que el punto de operación de la pila tiende al *estado Inundado*.

Esto obliga al controlador a reducir más el periodo de humectación, con el objetivo de que sea el propio gas el que realice el proceso de secado de la pila PEM. Sin embargo, como se comentó en la descripción de las Curvas V-I, Figura 6.37, al inyectar un caudal mayor al de referencia ($2 \times R_{ef} \cdot Q_{ca}$), durante la perturbación *salto de caudal*, se genera una recuperación del comportamiento eléctrico de la pila de combustible.

CONCLUSIONES

Conclusiones

Los objetivos de este trabajo han sido dos:

- El diseño y desarrollo de un sistema de detección de estado de pilas de combustible, en tiempo real, basado en un método de perturbaciones y parametrización de la respuesta para su posterior clasificación de los estados fundamentales para el funcionamiento de pilas de combustible de membrana polimérica, PEM.
- La integración del mismo en una arquitectura de percepción y control basada en agentes expertos para la supervisión y operación en modo autónomo y condiciones de humectación óptima, de pilas de combustible PEM.

La arquitectura de percepción y control basada en agentes expertos, posee una jerarquía de niveles con distinto grado de abstracción y ventana temporal, en la que se integran en los distintos agentes técnicas y modelos de:

- Control directo clásico.
- Control cualitativo basado en conocimiento experto.
- Control supervisor, por parte de un operador humano.

El enfoque modular de la propuesta, tanto funcional como físico, tiene como base los siguientes criterios:

- Independiente en el desarrollo de los procesos de control.
- Escalabilidad.
- Fiabilidad, versatilidad y robustez ante fallos e imprevistos.

- Facilidad en el mantenimiento.

El modelo de arquitectura jerárquica con agentes expertos se ha validado experimentalmente con monoceldas y pilas de combustible PEM en diferentes condiciones de trabajo y escenarios focalizado como ejemplo a la gestión de los fenómenos hídricos en la pila.

Aportaciones de este trabajo

Las aportaciones de este trabajo se pueden plantear como una fundamentación teórico-práctica que permite trasladar técnicas avanzadas de control a aplicaciones reales con pilas de combustible.

Las aportaciones más importantes del presente trabajo se resumen en los siguientes puntos:

- Modelado mediante un circuito eléctrico equivalente de una pila PEM en condiciones de modo simétrico. Los resultados obtenidos mediante la técnica de Espectroscopia de Impedancia Compleja permiten determinar variaciones en el grado de humectación de la pila PEM en función del cambio en las variables de estado. Esto permite determinar que variables de estado son prioritarias en el proceso de automatización y control de pilas de combustible PEM.
- Automatización del proceso de medición y control de las variables de estado de la pila PEM mediante una red de microprocesadores. Se ha propuesto un sistema innovador para la regulación del suministro de gases, cuando se opera con caudal alto. Se trata de un controlador borroso con “falsa referencia” que evita las oscilaciones de presión, y que constituye un hito en sí mismo. Además presenta ventajas tanto económicas, como de espacio y robustez, frente a los equipos comerciales de laboratorio.
- Diseño y desarrollo de una arquitectura de bajo nivel, basada en una red distribuida de procesadores que garantiza un sistema robusto para tareas de adquisición/procesado de señales, y control, con un protocolo eficiente de gestión de la información y comunicaciones. Esta arquitectura de control abierta, permite flexibilidad ante cambios e integración de nuevas variables o subsistemas. De hecho, se ha incorporado al mismo, un subsistema de carga eléctrica para maximizar sus prestaciones.
- Integración de técnicas de estímulo-respuesta y estrategias para la caracterización de estados críticos de operación de la pila, en función del grado de humedad de la membrana.
- Modelo de razonamiento aproximado en el control del grado de humectación de la pila PEM, para abordar por un lado las no linealidades del comportamiento eléctrico de la pila y la imprecisión del mundo real. El controlador borroso formulado permite mantener el punto de operación de la pila dentro de la zona óptima de humectación, lejos de las zonas críticas, garantizando la consecución de los objetivos.

- Integración de mecanismos de seguridad y alertas en varios niveles, de especial importancia en la operación autónoma de la pila.
- Implementación de una arquitectura multi-agente de expertos, en base a la descomposición y jerarquización funcional de los procesos de acuerdo con el principio de inteligencia creciente con velocidad decreciente. La arquitectura posibilita una estructuración en niveles con distinto grado de abstracción que engloban comportamientos reactivos y deliberativos, en función de la velocidad de respuesta requerida y del grado de abstracción de los conceptos que se manejan.
- Arquitectura de procesos planteada y demostrada es abierta y flexible, para integrar tanto nuevos algoritmos de percepción como técnicas de control y la reutilización de agentes para su utilización en diferentes aplicaciones
- Realización de un interfaz de usuario, agente MONITORIZAR, que permite al usuario tanto configurar el sistema y el escenario (aplicación) como almacenar y monitorizar en tiempo real la evolución temporal de las variables de estado de la pila.

Desarrollos futuros

Los trabajos de investigación realizados y presentados en esta memoria, han abierto futuros desarrollos, que se pueden clasificar en tres tipos:

Necesarios: son aquellos sin los cuales este trabajo no tiene continuidad.

- Analizar nuevos escenarios de aplicación para incorporar al agente CONTROL RENDIMIENTO la habilidad de control de la eficiencia máxima.
- Incorporar al agente CONTROL ESTADO la capacidad de actuar sobre otras variables de estado, como: temperatura de humectación, caudal, e incluso sobre la propia carga eléctrica, pues a mayor carga, mayor contenido de agua en la pila. En sistemas híbridos de suministro de energía, modulando la entrega de potencia p de la pila se puede controlar su grado de humectación.
- Investigación en nuevas técnicas de estimación del estado de operación, desarrollando motores de inferencia en tiempo real de fácil implementación en sistemas embebibles.

Aconsejables: Desarrollos que pueden resultar económicamente interesantes desde el punto de vista de uso de este tipo de sistema de gestión y organización del conocimiento, orientados a maximizar las prestaciones eléctricas de la pila de combustible PEM.

- El método de identificación y control propuesto para la gestión del estado de operación de la pila PEM, se puede implementar en un procesador rígidamente unido a la pila (monocelda o stack), que identifique en tiempo real los distintos parámetros y ajuste automáticamente el modelo, consiguiendo el mejor control en cada experimento.

- Integrar la arquitectura multi-agente en una aplicación energética de la pila de combustible PEM.

Exploratorios: Destinados fundamentalmente a incluir otros modelos y tecnologías del el área del control inteligente.

- Utilización de redes neuronales para determinación del estado de la pila.
- Inclusión de mecanismos de aprendizaje para la mejora del modelo o el establecimiento de patrones.

Finalmente, exponer que este trabajo constituye un paso hacia la automatización progresiva, de la supervisión, percepción y control inteligente de pilas de combustible, y para la investigación en diferentes escenarios de aplicación que permitan aumentar los beneficios potenciales, tanto económicos, como medioambientales y de reducción de riesgos en el funcionamiento de los nuevos diseños de pilas PEM.

ANEXO I. Cálculo de variables de estado

I.1. Requerimientos máximos de caudal anódico y cátodico

Los flujo de caudal másico consumido tanto en el lado anódico (combustible) como en el lado catódico (oxígeno/aire) son dependientes de la potencia eléctrica producida por la pila de combustible. La intensidad de corriente eléctrica que fluye desde el cátodo hacia el ánodo de una pila es una medida del flujo de electrones presentes en la reacción electroquímica. Así, la cantidad de caudal de hidrógeno consumido depende de la corriente eléctrica producida y de su estequiometría. Si se parte de la simple reacción electroquímica presente en una pila de combustible, ecuación (I.1.0), se puede decir que exactamente *dos* moléculas de hidrógeno son necesarias para *cada* molécula de oxígeno, en otras palabras, *dos* electrones e^- son transferidos por *cada* molécula de hidrógeno [James L. y Andrew D, 2000], la carga q es igual a:

$$\text{Carga } (q) = 4 F \times \text{cantidad de } O_2 \quad (\text{I.1.0})$$

Dividiendo para el tiempo ambos términos de la ecuación (I.1.0) se tiene:

$$\left(\frac{\text{carga } (q)}{t} \right) = 4F \left(\frac{\text{Cantidad } O_2}{t} \right) \quad (\text{I.1.1})$$

Reordenando términos en la ecuación (1.1) se tiene:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{I}{4F} [\text{moles} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{I.1.2})$$

Esta ecuación representa el oxígeno utilizado por una monocelda en función de la corriente, la cual para un pequeño stack compuesto de n monoceldas viene dada por:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{I n}{4F} [\text{moles} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{I.1.3})$$

Sin embargo, es más útil tener el consumo de caudal en términos de la potencia P_e [W] y sin la necesidad de conocer el número de celdas presentes en el stack. Si el voltaje de cada monocelda es V_c [Voltios], entonces, la potencia eléctrica es:

$$P_e = V_c \times I \times n \quad (\text{I.1.4})$$

No obstante, tanto el hidrógeno como el oxígeno son a menudo alimentados en grandes proporciones estequiométricas, especialmente para el oxígeno si este está siendo alimentado desde aire comprimido. Por lo que, despejando I de la ecuación (I.1.4) y sustituyendo en la ecuación (I.1.3), además, considerando λ_{O_2} la estequiometría del oxígeno, se tiene que el flujo másico para el oxígeno viene determinado por la ecuación (I.1.5).

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{P_e \cdot \lambda_{O_2}}{4 \cdot V_c \cdot F} [\text{moles} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{I.1.5})$$

En la práctica [$\text{moles}\cdot\text{s}^{-1}$] no se utiliza como unidad, de hecho, comúnmente se utiliza el flujo másico en litros normalizados por minuto [Ln/min], por lo que la ecuación (I.1.5) queda:

$$\dot{m}_{O_2} = 3,48 \times 10^{-3} \cdot \lambda_{O_2} \cdot \frac{P_e}{V_c} \left[\text{Ln} \cdot \text{min}^{-1} \right] \quad (\text{I.1.6})$$

Esta ecuación permite calcular el oxígeno utilizado en un stack de celdas de combustible dada su Potencia [W]. Si V_c (voltaje de celda) no se conoce, el valor de **0.65** Voltios puede utilizarse como una buena aproximación. En el presente trabajo, el voltaje mínimo a la cual la celda de combustible opera es asumido como **0.6** Voltios y como valores típicos de λ_{O_2} son: [1,0 – 2,0]. Normalmente, el oxígeno utilizado en un stack de monoceldas de combustible tipo PEM es tomado desde el aire, por lo que será necesario conocer la cantidad de aire utilizado. La proporción molecular de oxígeno en aire es de *0.21* ($O_2/\text{Aire} = 0.21$), y la masa molecular del aire es $28.97 \text{ [Kg}\cdot\text{mol}^{-1}]$. Reemplazando estos valores en la ecuación (1.6) se tiene:

$$\dot{m}_{\text{Aire}} = 18,21 \times 10^{-3} \cdot \lambda_{\text{Aire}} \cdot \frac{P_e}{V_c} \left[\text{Ln} \cdot \text{min}^{-1} \right] \quad (\text{I.1.7})$$

Los valores típicos de λ_{Aire} son: [2,0 – 2,5]. El valor máximo del flujo de aire que se debe regular está determinado por la ecuación (I.1.7). Para encontrar el máximo caudal de hidrógeno que se debe regular, partimos del mismo principio que para el oxígeno. El caudal real de hidrógeno depende de la corriente entregada por la pila y la estequiometría del hidrógeno. Típicamente se trabaja con hidrógeno puro, lo que corresponde a una proporción estequiométrica de exactamente 1. Sin embargo para proveer de flexibilidad en el funcionamiento de la pila se utiliza como criterio de diseño una proporción estequiométrica de 1,5. La ecuación (I.1.8) determina el máximo caudal de hidrógeno utilizado dado la potencia máxima entregada por la pila de combustible.

$$\dot{m}_{H_2} = 7,51 \times 10^{-3} \cdot \lambda_{H_2} \cdot \frac{P_e}{V_c} \left[\text{Ln} \cdot \text{min}^{-1} \right] \quad (\text{I.1.8})$$

En la práctica no solo se utiliza [$\text{Ln}\cdot\text{h}^{-1}$] como unidad, también es comúnmente utilizado [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$], siendo importante para conocer el tamaño de los depósitos de almacenamiento de hidrogeno, la ecuación (I.1.9) determina este valor es:

$$\dot{m}_{H_2} = 0,451 \times 10^{-3} \cdot \lambda_{H_2} \cdot \frac{P_e}{V_c} \left[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \right] \quad (\text{I.1.9})$$

I.2. Modelo eléctrico en la regulación de presión

El sistema de regulación de presión mediante la modulación de ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation) en línea de suministro de gas catódico, se presenta en la Figura I.2.1. La corriente del flujo de gas a través de la restricción hidráulica R_1 es una función de la diferencia de presión de entrada y salida del gas en la línea de suministro. Además, TP es el transductor de presión que permite al controlador activar o no la electroválvula de salida del gas. Para encontrar la función de transferencia de este sistema, se analiza la posición de la electroválvula en sus dos estados de funcionamiento, esto es, abierto y cerrado. Los parámetros de la presión de entrada, P_i , y control, P_c , en la línea de suministro del gas reactante son mostrados en la Tabla I.2.1

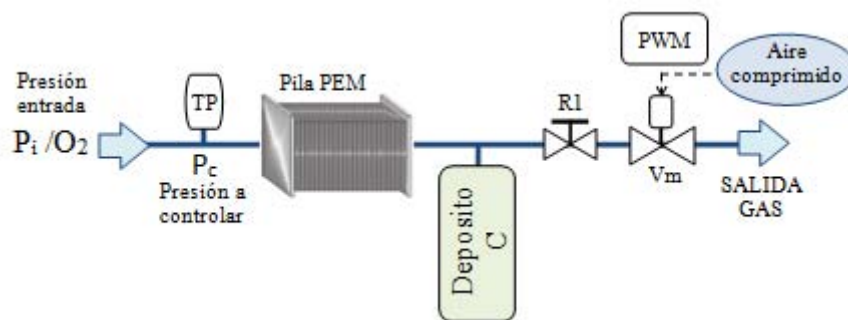


Figura I.2.1 Sistema de regulación de presión mediante PWM en línea.

Tabla I.2.1. Rango de valores de la presión de entrada y control en la pila de combustible.

| DESCRIPCIÓN | VARIABLE | RANGO [Bar] | PRECISION |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------|
| SUMINISTRO DE GASES DE REACCION | PRESIÓN DE ENTRADA P_i [Bar] | 4 | $\pm 0,1$ Bar |
| PRESION EN LA PILA | PRESIÓN DE CONTROL P_c [Bar] | 0 – 4 | $\pm 0,1$ Bar |

Válvula cerrada.- se determina la función de transferencia que define al sistema de regulación de presión con la válvula cerrada, Figura I.2.2.a. Este subsistema, indica que la presión del gas en la línea se incrementa hasta alcanzar la presión de entrada, posteriormente no se tendrá ningún flujo de caudal en línea.

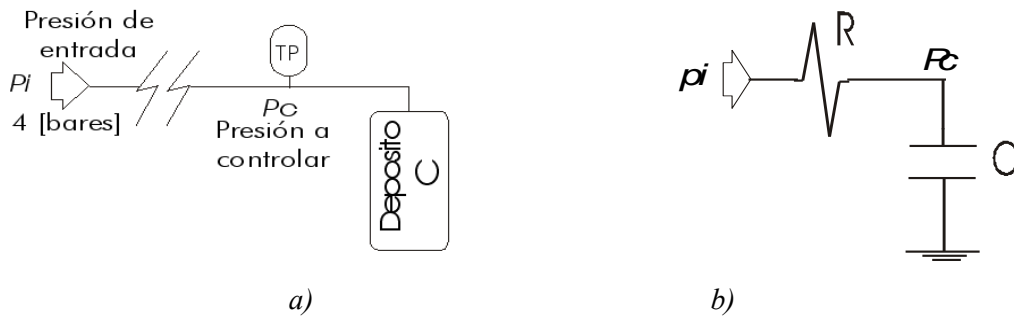


Figura I.2.2. Sistema de regulación de presión en estado cerrado de la electroválvula, a) subsistema físico, b) modelo eléctrico análogo.

Aplicando los conceptos de capacitancia y resistencia en sistemas de gases a presión, se puede encontrar las ecuaciones que rigen este subsistema [Ogata K., 1998].

La **resistencia** del flujo del gas R está definida como la relación entre: el cambio en la presión del gas y el cambio en el flujo del gas, Eq. (I.2.0).

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de presión del gas}}{\text{Cambio en el flujo de gas}} = \frac{d(\Delta P)}{d(\Delta Q)} \quad (\text{I.2.0})$$

De la misma manera, la **capacitancia** del recipiente o depósito a presión se define como la relación entre el cambio en el gas almacenado y el cambio en la presión del gas, ecuación (I.2.1)

$$C = \frac{\text{Cambio en el gas almacenado}}{\text{Cambio en la presión del gas}} = \frac{dm}{d(\Delta Q)} \quad (\text{I.2.1})$$

Si se suponen desviaciones pequeñas de las variables a partir de sus valores en estado estable respectivos, este sistema se puede considerar lineal [32]. Para valores pequeños de pi , po , qi y qo , la resistencia R obtenida mediante la ecuación (I.2.2) se vuelve constante y puede ser escrita como:

$$R = \frac{pi - po}{qi - qo} \quad (\text{I.2.2})$$

De la ecuación (I.2.1) podemos decir que el cambio de presión $d(po)$ multiplicado por la capacitancia C del recipiente es igual al gas añadido durante dt segundo, obtenemos:

$$C dpo = (qi - qo) dt \quad (\text{I.2.3})$$

Reemplazando la ecuación (I.2.2) en la ecuación (I.2.3) y agrupando términos semejantes tenemos la ecuación diferencial del sistema de regulación de presión, tal como se muestra en la ecuación (I.2.4).

$$RC \frac{dpo}{dt} + po = pi \quad (\text{I.2.4})$$

Ahora, aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (I.2.4), se puede obtener la función de transferencia que rige al sistema de regulación de presión considerando la electroválvula cerrada.

$$\frac{Po(s)}{Pi(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (I.2.5)$$

Donde, RC esta expresado en unidades de tiempo y representa la constante del tiempo del sistema de primer orden. Una manera fácil y sencilla de representar el sistema de regulación de presión (válvula cerrada) mediante la analogía a un circuito eléctrico equivalente, es mostrada en la Figura I.2.1.b. Los valores de la constante de tiempo son determinados de manera analítica C y experimental R .

Calculo de la capacitancia C .- el valor de la capacitancia se calcula mediante la ley de los gases ideales ecuación (I.2.6). Como se observa, la capacitancia C depende principalmente del volumen del recipiente, y su valor es $C = 8,35 \left[\frac{ml}{bar} \right]$.

$$C = \frac{V}{n R_{gas} T} \quad (I.2.6)$$

Calculo de la resistencia R .- el valor de la resistencia de flujo de gas R , puede ser determinada con facilidad de forma experimental, esto es, calculando la pendiente de la curva “diferencia de presión vs flujo que atraviesa” en unas condiciones de operación determinadas, tal como se aprecia en la Figura I.2.3, su valor para este caso es:

$$R = 0,0179 \text{ bar} \cdot \text{min/ml}.$$

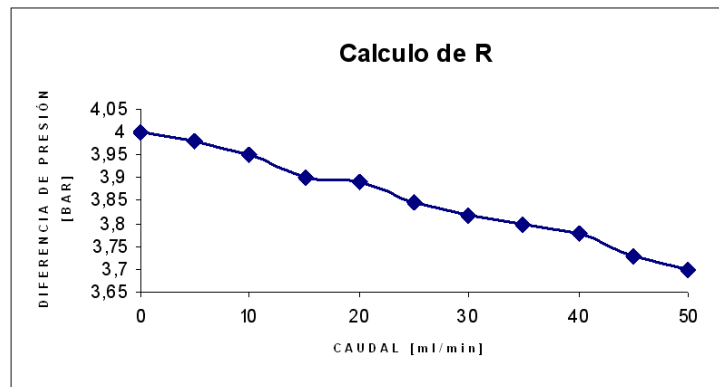


Figura I.2.3. Curva experimental, para el cálculo de la resistencia al flujo de gas R

Válvula abierta.- El sistema físico de regulación de presión con el estado abierta de la electroválvula está indicado en la Figura I.2.4.a, este sistema indica que la presión en la línea de suministro de gas decrece hasta alcanzar la presión atmosférica. La función de transferencia que define este sistema puede encontrarse mediante el mismo análisis realizado al sistema con la electroválvula cerrada. Esto es, empleando los mismos conceptos de Resistencia, Capacitancia y desviaciones pequeñas en las variables a partir de sus valores en estado estable respectivos (sistema lineal) [Ogata K., 1998], la ecuación diferencial que rige este sistema es representado con la ecuación (I.2.7).

$$RC \frac{dp_c}{dt} + p_c \left(1 + \frac{R}{R_1}\right) = p_i \quad (I.2.7)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación diferencial (I.2.7), la función de transferencia de este sistema queda descrita mediante la ecuación (I.2.8). Una manera fácil y sencilla de representar el sistema de regulación de presión (válvula abierta) mediante la analogía a un circuito eléctrico equivalente, es mostrada en la Figura I.2.4.b.

$$\frac{P_c(s)}{P_i(s)} = \frac{1}{RCs + \left(1 + \frac{R}{R_1}\right)} \quad (I.2.8)$$

El valor de R_1 puede encontrarse de la misma manera descrita en el cálculo de la resistencia R , es decir, mediante la pendiente de la curva en unas condiciones de operación determinada.

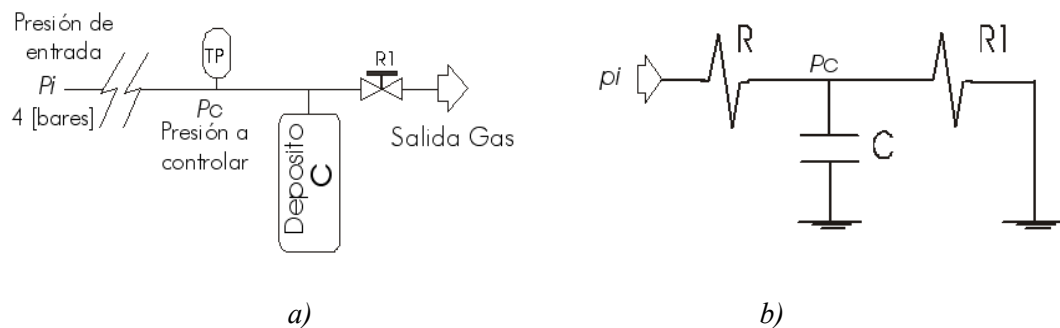


Figura I.2.4. Sistema de regulación de presión en estado abierto de la electroválvula. a) subsistema físico, b) modelo eléctrico análogo.

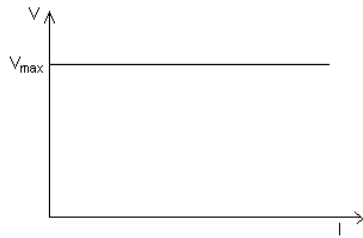
Mediante el método de superposición de sistemas, la presión P_c a la entrada de la pila de combustible puede expresarse mediante las ecuaciones diferenciales que rigen los dos estados de operación de la válvula, esto es, abierto y cerrado, y por tanto la función de transferencia de la presión P_c queda:

$$P_c = \begin{cases} P_c(s) = \frac{P_i(s)}{RCs + 1} & \rightarrow \text{Válvula cerrada} \\ P_c(s) = \frac{P_i(s)}{RCs + \left(1 + \frac{R}{R_1}\right)} & \rightarrow \text{Válvula abierta} \end{cases}$$

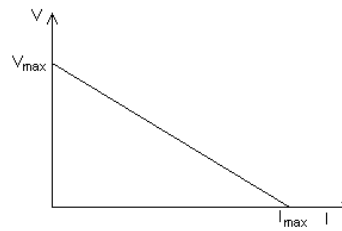
I.3. Modelo idealizado mediante la curva V-I

La carga electrónica estará constituida por una red de resistencias conmutables que permitirán disipar una potencia máxima 100W. El sistema debe permitir la transmisión de corrientes de hasta 20A y tensiones de hasta 3V. Los valores de corriente deben estar repartidos de manera homogénea en todo el rango dinámico. Los valores de resistencia a aplicar se calculan a partir de cuatro supuestos de una ficticia curva de Tensión–Corriente.

Supuesto 1. La respuesta corriente-tensión se comporta como una fuente de tensión ideal, Figura I.3.1.a.



a) Modelo de fuente de tensión ideal



b) Modelo de caída constante

Figura I.3.1 Modelos utilizados para el cálculo de los valores de resistencia de la carga eléctrica.

La ecuación (I.3.0) expresa los valores de resistencia en este supuesto:

$$R = \frac{V_{\max}}{I} \quad (\text{I.3.0})$$

Los valores de resistencias calculados con la ecuación (I.3.0) resultarían superiores a los que se deberían aplicar para obtener una curva adecuada según los criterios descritos anteriormente, reservándose su uso para caracterizar muchas pilas electroquímicas convencionales.

Supuesto 2. La respuesta es una tensión que cae linealmente con la corriente, Figura I.3.1.b. La ecuación que expresa los valores de resistencia de este modelo es la siguiente:

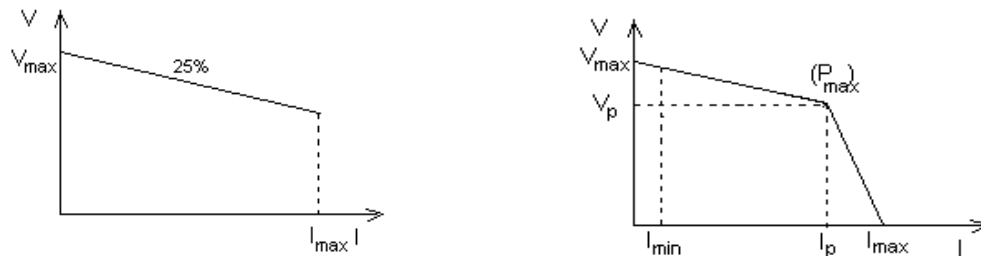
$$R = V_{\max} \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_{\max}} \right) \quad (\text{I.3.1})$$

En este supuesto, al contrario que en el anterior, resuelve valores de resistencias inferiores a lo descrito teórica y empíricamente. El segundo supuesto es válido para caracterizar pilas de combustible con bajo rendimiento y donde no se alcanza los valores de corriente límite ya que la tensión para la corriente máxima es cero.

Supuesto 3. Otra relación corriente-tensión considerada es aquella en la que la tensión tiene una caída con una pendiente definida respecto de la corriente, hasta el valor de corriente máxima, Figura I.3.2.a. la ecuación (I.3.2) expresa esta relación.

$$R = V_{\max} \left(\frac{1}{I} - \frac{p}{I_{\max}} \right) \quad (\text{I.3.2})$$

Donde p es el valor de la pendiente de caída. A pesar de que este supuesto se acerca más al comportamiento real de una pila, lo es sólo para el tramo en el cual la pila tiene un comportamiento de caída óhmica y no considera la caída abrupta que experimenta para valores de corriente superiores y donde se manifiestan efectos de déficit de transporte de masa.



a) Caída de tensión con pendiente definida. b) Curva de polarización idealizada

Figura I.3.2. Modelo de caída de tensión e idealizado de la curva de polarización de la pila

Supuesto 4. Esta curva correspondería a la mayor aproximación a una curva real de una pila de combustible. Refleja básicamente el comportamiento, con dos ramas. Una rama con una caída de tensión suave hasta alcanzar el valor de máxima potencia, y otra en la cual la pila se inestabiliza y la tensión cae rápidamente. Es importante aplicarle valores umbrales de corriente y tensión para que al hacer los cálculos no se computen los valores críticos de tensión a cortocircuito (tensión cero) y a circuito abierto (corriente cero). Figura I.3.2.b.

El primer tramo corresponde a la parte de funcionamiento estable con una caída moderada. El segundo tramo representa una fuerte caída por inestabilidad. El punto de inflexión entre las dos ramas está definido por el valor de máxima potencia. Los dos tramos están expresados por la ecuación (I.3.3) e (I.3.4).

Tramo de caída moderada:

$$R1 = m1 + \frac{V_{\max}}{I} \quad (I_{\min} < I < I_p) \quad (I.3.3)$$

$$m1 = \left(\frac{V_p - V_{\max}}{I_p} \right) \quad (I.3.4)$$

Tramo de caída más abrupta:

$$R2 = m2 + \left(\frac{V_p}{I} \right) \left(1 + \frac{I_p}{(I_{\max} - I_p)} \right) \quad (I_p < I < I_{\max}) \quad (I.3.5)$$

$$m2 = - \frac{V_p}{(I_{\max} - I_p)} \quad (I.3.6)$$

Utilizando este último supuesto como el modelo más adecuado para calcular los valores de las resistencias a aplicar, se ha desarrollado un programa en la herramienta matemática Mat-Lab. La elección del número de valores a calcular en cada rama de la curva de polarización dependerá del peso de información que se obtenga de dichos datos, ya que se debe incrementar la

densidad de puntos donde la información del sistema derivada del análisis de la curva de polarización sea mayor.

1.4. Modo de operación del sistema de clasificación heurístico

En este apartado, se presenta el diseño inicial de la aplicación con interfaz gráfica, para las pruebas preliminares y que permite ajustar en la fase de experimentación de estimación del estado de operación de la pila PEM. La aplicación permite obtener los parámetros de estado y visualización de los estados críticos Inundado y Seco, y Normal de operación de la pila PEM. La aplicación está pensada para funcionar de manera semi-automática. Así, en un primer nivel, el sistema de clasificación se puede considerar como una caja negra que se relaciona con el exterior mediante entradas y salidas, Figura I4.1

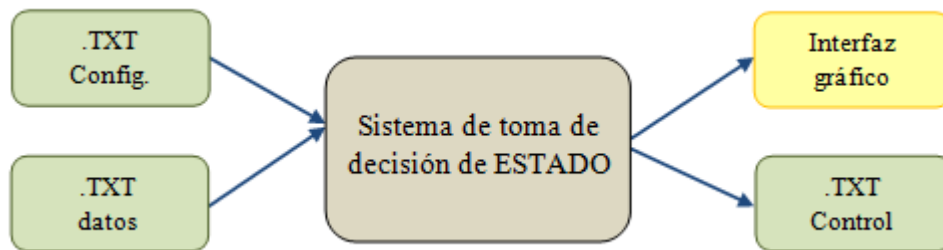


Figura I.4.1. Flujo de datos en el sistema de decisión de estados.

El sistema de decisión recibe como entradas dos ficheros texto:

1. Un fichero de configuración de las variables lingüísticas {ALTO, MEDIO, BAJO} de los parámetros de estado: amplitud de oscilación de voltaje, punto cambio de pendiente y diferencia de voltaje, y sus respectivas funciones de pertenencia.
2. Un fichero de datos, donde se encuentran los valores instantáneos de las perturbaciones realizadas a la pila PEM (evolución temporal del voltaje generado por la pila) y los datos numéricos suministrados por las variables de estado de la pila.

La salida del sistema de decisión consiste en informaciones presentada por pantalla y en fichero de datos sobre el estado de operación de la pila de combustible.

- El resultado se muestra al usuario por pantalla, para que realice el protocolo de actuación específico, y.
- El resultado se almacena en un fichero para ser utilizado posteriormente por los algoritmos de control.

Se puede distinguir cuatro módulos en el sistema de decisión de estado, Figura I.4.2:

- Adquisición de datos (entradas)
- Preproceso de datos y Fuzzyficacion de variables
- Razonamiento y toma de decisiones
- Visualización de resultados (salidas)

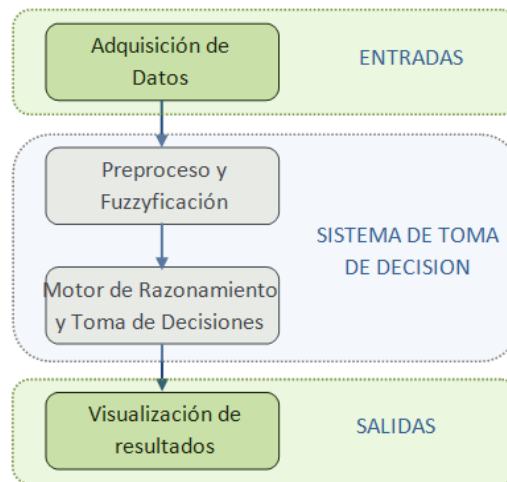


Figura I.4.2 Diagrama de módulos del sistema de decisión de estados.

▪ I.4.1 Módulo de adquisición de datos

Para la adquisición de los datos de operación de la pila en tiempo real, se utiliza el paso de datos a través de un fichero texto (.txt). En este fichero se almacenan los datos referentes a la evolución temporal del voltaje generado por la pila, e información sobre el estado de la pila proporcionada por los sensores. El sistema obtiene el valor numérico de los parámetros amplitud de oscilación de voltaje, punto cambio de pendiente y diferencia de voltaje, a partir de este fichero.

El usuario puede definir las funciones de pertenencia de los parámetros de estado (perturbaciones a realizar), con el objetivo de ajustar al máximo las restricciones del proceso de razonamiento, si lo desea. Esto se realiza mediante el fichero de configuración TXT, Figura I.4.3.

```

</Variables>
<Oscilación voltaje> <Cambio de pendiente> <Delta voltaje>
<Baja vértice1 vértice2 vértice3 vértice4>
<Media vértice1 vértice2 vértice3 vértice4>
<Alta vértice1 vértice2 vértice3 vértice4>
  
```

Figura I.4.3 Parámetros de configuración de las funciones de pertenencia de las variables del sistema de decisión de estados.

El módulo de adquisición por tanto, se encarga de recopilar los datos procedentes de las diferentes fuentes para pasarlos al módulo de preproceso y fuzzyficación.

▪ I.4.2. Módulo de preproceso y fuzzyficación

Este modulo recibe como entrada, la información procedente del modulo de recepción de datos. Dependiendo del carácter de la información, el tratamiento de la misma se realiza de dos formas diferentes:

1) En el caso de tratarse de los valores numéricos de los parámetros de estado: amplitud de oscilación de voltaje, punto cambio de pendiente y diferencia de voltaje, variables del proceso de razonamiento, se procede al cálculo del grado de pertenencia a la etiqueta lingüística {ALTO, MEDIO, BAJO} de la variable correspondiente.

El modelo de representación de los valores de una etiqueta lingüística del parámetro de estado correspondiente, se realiza mediante una función de pertenencia trapezoidal. Por tanto, cada etiqueta lingüística de cada una de las variables, queda unívocamente determinada por cuatro puntos que describen los segmentos que definen la función, Figura I.4.4.

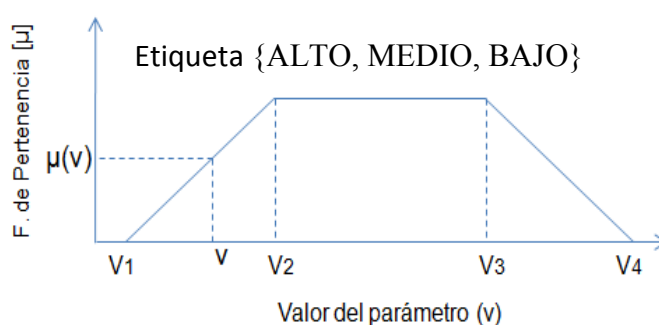


Figura I.4.4. Representación gráfica de la variable (ΔV , σv , ΔP).

Por tanto, el grado de pertenencia del valor del parámetro que corresponde a una determinada etiqueta lingüística {ALTO, MEDIO, BAJO}, viene determinado por la ecuación (I.4.1), y es función del valor del parámetro y los límites de la etiqueta.

$$\mu^{etiqa}(v) = \max \left\{ 0, \min \left(1, \frac{V_4 - v}{V_4 - V_3}, \frac{v - V_1}{V_2 - V_1} \right) \right\} \quad (I.4.1)$$

Donde: V_1 , V_2 , V_3 y V_4 , son los límites de las etiquetas lingüísticas de cada parámetro, v es el valor del parámetro y $\mu^{etiqa}[v]$ presenta el valor de la función de pertenencia correspondiente al valor del parámetro v .

2) En el caso de que la información provenga del fichero de configuración, se procede a la reconstrucción de las funciones de pertenencia que determinaran los valores lingüísticos de las variables, en el caso de que se necesite ajustar dichas funciones para otras pilas. Del fichero de entrada se obtiene, los cuatro puntos que definen la función de pertenencia trapezoidal de cada variable, requeridos para la definición de cada una de las funciones.

▪ I.4.3. Módulo de razonamiento y toma de decisiones

Este modulo recibe como entradas las variables lingüísticas {ALTO, MEDIO, BAJO} de los parámetros de estado, y genera como salida el estado de operación de la pila. El módulo de razonamiento y toma de decisión hace uso de un árbol de decisión borroso para la estimación del estado de la pila PEM.

La función de cálculo del grado de pertenencia a cada rama del nodo del árbol borroso, se realiza de la siguiente manera:

- 1) **IF**, para llegar a un estado se toman varias opciones consecutivamente (similar a un “and”), Eq (I.4.2), **THEN**, se multiplican sus funciones de pertenencia, Eq (I.4.3).
- 2) **IF**, para llegar a un estado se puede ir alternativamente por varias opciones (similar a un “or”), Eq (I.4.4), **THEN** se suman las funciones de pertenencia, Eq (I.4.5).
- 3) Al final, el estado de operación de la pila de combustible PEM se determina mediante su grado de pertenencia. Esto es, en lugar de quedarse con un único estado, se considera que la pila PEM está en más de un estado a la vez, con un grado de pertenencia a cada estado. Esto permite recoger la granularidad y la incertidumbre de la situación real de la pila.

$$(\sigma v)_{alto} \wedge (\Delta P)_{alto} \Rightarrow SECO \quad (I.4.2)$$

$$\mu(\sigma v)_{alto} \cdot \mu(\Delta P)_{alto} = \mu SECO \quad (I.4.3)$$

$$[(\sigma v)_{alto} \wedge (\Delta P)_{medio}] \vee [(\sigma v)_{medio} \wedge (\Delta P)_{alto}] \Rightarrow NORMAL \text{ a } SECO \quad (I.4.4)$$

$$[\mu(\sigma v)_{alto} \cdot \mu(\Delta P)_{medio}] + [\mu(\sigma v)_{medio} \cdot \mu(\Delta P)_{alto}] = \mu NORMAL \text{ a } SECO \quad (I.4.5)$$

La ecuación (I.4.6) presenta la manera de determinar el valor de pertenencia a cada estado de operación de la pila PEM en función del valor de pertenencia a las etiquetas lingüísticas del parámetro de estado.

$$\mu_i = \sum_{j=\max(0, i-2)}^{\min(i, 2)} \mu'_j \cdot \mu''_{i-j} \quad (I.4.6)$$

Donde: i representa a los estados de operación de la pila PEM, nodos terminales del árbol borroso; μ' y μ'' representa el valor de pertenencia del parámetro a sus respectivas etiquetas; j representa la etiqueta lingüística del parámetro.

El sistema recorre los nodos del árbol que corresponden a las variables, ramificando en función de la restricción establecida por el valor borroso de la variable, obtenido mediante la función de la ecuación (I.4.1). En cada nodo se conoce la información lingüística de la que dispone el sistema, por lo que únicamente se permite el acceso al conocimiento que verifica las restricciones previas, Eq (I.4.6), sobre los valores de las variables. De esta manera se accede única y exclusivamente a los bloques de la base de conocimiento que tienen relevancia para la toma de decisión en la estimación del estado de la pila PEM.

▪ **Módulo de salida**

El sistema de estimación, por una parte, muestra al usuario en una interface las decisiones tomadas por el sistema de razonamiento en lo que respecta a la estimación del estado de operación de la pila PEM. Y, por otra parte, se presenta los resultados de la estimación en un fichero texto para su posterior utilización.

Referencias

Patentes:

[Agila W. 2007] W. E. Agila; D. Guinea; E. Villanueva; M. C. García-Alegre; D. M. Guinea. Test station for Proton-Exchange-Membrane Fuel-Cells characterization. Número de Patente solicitada: P2007_00544. Número de publicación: ES2342797.

[Guinea D. 2010] D. Guinea; E. Villanueva; M. C. García-Alegre; D. M. Guinea; David Martín. Pila de combustible de membrana única. Número de Patente solicitada: P2010_00043.

Bibliográfica:

[Abshishek S. y Asad D, 2004] Abshishek Sakhoro, Asad D., FLC for Fuel Cell for stand alone and grid connection, *Journal of Power Sources* 135 (2004), pp 165-176.

[Adjemian K. T., 2002] K. T. Adjemian; S. Srinivasan; J. Benziger; A. B. Bocarsly. 2002. "Investigation of PEMFC operation above 100°C employing perfluorosulfonic acid silicon oxide composite membranes". *Journal of Power Sources*. Volumen 109. Páginas 356-364. [doi:10.1016/S0378-7753\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00086-1).

[Agila W., 2012] W. Agila, D.M. Guinea, D. Martín, M.C. García-Alegre, D. Guinea, C. Balaguer. A real time dehydration and flooding perception technique for PEMFC state estimation. *International Journal of Hydrogen Energy*, (enviada por invitación 15/04/12).

[Agila W., 2011] W. Agila, D.M. Guinea, M.C. García-Alegre, D. Guinea, C. Balaguer. A real time dehydration and flooding perception technique for PEMFC state estimation. *Hypohthesis IX*, San José (Costa Rica), 12-15 diciembre 2011. ISBN: 978-9968-641-08-1.

[Agila W. 2005] W. Agila, M.A. Rubio, L. González, E. Villanueva, D. Guinea; Gas flow management in PEM Fuel Cells operation. X Libro Proc. EHEC "2nd European Hydrogen Energy Conference", (2005).

[Agila W. 2003] W. Agila, E. Villanueva, L. González, M.A. Rubio, E. Cotillas, S. Ros, D. Guinea; Instrumentación y control de una PEMFC 500W. XXIV Jornadas de Automática, (2003).

[Andreas B., 2004] B. Andreas, G.G. Scherer. *Proton-conducting polymer membranes in fuel cells—humidification aspects*. *Solid State Ionics*. Volume 168. 2004. Pages 311-320.

[Akira Taniguchi, 2008] Akira Taniguchi, Tomoki Akita, Kazuaki Yasuda, Yoshinori Miyazaki, "Analysis of degradation in PEMFC caused by cell reversal during air starvation", *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008), pp. 2323-2329.

[Arkin, R. C. 1987] Arkin, R. C. (1987). Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation. *International Journal of Robotics Research*, 8(4):92–112.

[Ballard, 2010] Resumen de pilas de combustible de cogeneración de Ballard. http://www.ballard.com/Cogeneration_Fuel_Cells/Application_Overview.htm.

[Bellifemine F. 2007] Fabio Bellifemine, Giovanni Caire, Dominic Greenwood, Developing multi-agent systems with Jade, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05747-6.

[Berger C. 1968] Berger C. 1968, Handbook of Fuel Cell Technology, Prentice Hall, New York.

[Besel, 2010] Banco de ensayos para pilas de combustible PEM. Besel, www.besel.com.

[Boukamp, B. A., 1989] Boukamp, B. A., “Equivalent circuit users manual”. Department of Chemical Technology, University of Twente, Netherlands. 1989

[Cañas, J. y García-Alegre, M. 1999] Cañas, J. y García-Alegre, M. (1999). Modulated Agents for Autonomous Robot Piloting. En *Proceedings of the 8 Conf. Española para la Inteligencia Artificial (CAEPIA '99)*, págs. 98–106, Murcia (España).

[Ciureanu M., 1999] Ciureanu M., H. Wang, “Electrochemical Impedance Study of Electrode-Membrane Assemblies in PEM Fuel Cells”. H. Power Enterprises of Canada, Canada. Journal of the Electrochemical Society, (1999).

[Djilali N., 2002] N. Djilali; D. Lu. “Influence of heat transfer on gas and water transport in fuel cells”. International Journal of Thermal Sciences. Volume 41, number 1. 2002. Pages 29-40.

[DLR. 2011] Institute of Technical Thermodynamics, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR. (2011). Documento PDF “Resultados actuales de pilas PEFC y DMFC”. <http://www.dlr.de/tt/en/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/elchemenergietechnik/Ke nmlinienenglneu.pdf>.

[EEA, 2012] Europe’s environment-the fourth assessment: Sustainable consumption and production, technical report, European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012>

[EEA, 2008] EEA Report No 4/2008, <http://www.eea.europa.eu/themes/climate>.

[Eftichios K., 2006] Eftichios Koutroulis, Dionissia K., Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic / Wind-generator systems using genetic algorithms. Solar Energy 80 (2006), pp1072-1088.

[Electrochem, 2010] “Testing Equipment” de fuelcell.com, perteneciente a Electrochem. fuelcell.com: <http://fuelcell.com/index.asp?PageAction=VIEWCATS&Category=20>.

[Fang-Bor Wang, 2008] Fang-Bor Wang, Bo-Shian Jou, Chun-Wei Li, Ay Su, Shih-Hung Chan, “The effect of low humidity on the uniformity and stability of segmented PEM fuel cells”, Journal of Power Sources 181, (March 2008), pp. 251-258.

[FC-District, Grant, no 260105] FC-DISTRIC. New μ -CHP network technologies for energy efficient and sustainable districts. Project co-funded by EC. Grant no 260105, www.fc-district.eu

[Freire, T., 2000] Freire, T., J. P., E. R. Gonzalez, “Effect of membrane characteristics and humidification conditions on the impedance response of polymer electrolyte fuel cells”. Departamento de Fisico-Química, Universidade de Sao Paulo. Publicado en *Journal of The Electroanalytical Chemistry*. Elsevier (2000).

[García-Alegre M. C. 2010] María C. García-Alegre, Javier Rivas, David Martín, Matilde Santos. “Aprendizaje mediante arboles de decisión”. © RA-MA. 2010

[García-Alegre, M.C. 1991] García-Alegre, M.C. (1991) *Inteligencia Artificial en el control de procesos: Controladores borrosos*, Mundo Electrónico, 214, pp. 42-49.

[García-Alegre, M. 1998] García-Alegre, M. C. y Recio, F. (1998). Basic Visual and Motor Agents for Increasingly Complex Behavior Generation on a Mobile Robot. *Autonomous Robots*, 5:1–10.

[García-Alegre, M., 1995] García-Alegre, M., P.Bustos, y D.Guinea (1995). Complex behaviour generation on autonomous robots: A case study. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, págs. 1729–1734, Vancouver (Canadá).

[García-Alegre, M. y Guinea, D. 1992] García-Alegre, M. C. y Guinea, D. (1992). Building and architecture for a farming robot. En *Bio-Robotics 97. International Workshop on Robotics and Automated Machinery for bio-Productions*, págs. 255–260, Gandia (España).

[García-Alegre M.C. 1992] M.C. García-Alegre, R. García Rosa, J. Gasós and P. D. Fernández-Zuliani.(1992) “Fuzzyshell”. CSIC trademark 1643983, copyright 16045.

[Guinea D.M., 2008] D.M. Guinea, W. Agila, M.C. García-Alegre, D. Guinea; Fuzzy Logic pressure control in a PEM fuel cell test station. Hyceltec 2008. I Simposium Ibérico de Hidrógeno, Pilas de Combustible y Baterías Avanzadas, (2008).

[Guinea D. 1995] Guinea, D., Sánchez, G., Bustos, P., y García-Alegre, M. (1995). A Distributed Architecture for Active Perception in Autonomous Robots. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, págs. 1740–1745, Vancouver (Canadá).

[Hankache W., 2009] W. HANKACHE, S. CAUX, D. HISSEL, Real time Fuzzy Energy management of Fuel Cell and Ultracapacitor Powertrains. (2009).

[H2Susbuild, FP7] H2Susbuild, H2_Susbuild: Development of a clean and energy self-sustained building in the vision of integrating H2 economy with renewable energy sources. Proyecto de I+D, enmarcado dentro del Séptimo programa Marco FP7. <http://www.h2susbuild.ntua.gr>

[Hirota y (eds.), 1995] Hirota, K. y (eds.), M. S. (1995). *Industrial Applications of Fuzzy Technology in the World*. World Scientific.

[Hombrados A.J.G^a, 2005] A.J.G^a. Hombrados, M.A. Rubio, W. Agila, L. González D. Guinea, E. Chinarro, B. Moreno, J.R. Jurado, “Symmetrical electrode mode for PEMFC characterization by impedance spectroscopy”, *Journal of Power Sources* 151, (junio 2005), pp. 25-31.

[HP 4192] HPTrack.c, programa para la adquisición de datos con el HP 4192 A LF, desarrollado en el Instituto de Automática Industrial del Centro de Investigaciones Científicas.

[Hydrogenics, 2011] Equipamientos de ensayo de pilas de combustible de Hydrogenics.: [http:// www.hydrogenics.com/test/](http://www.hydrogenics.com/test/).

[ICP, 2009] Fuel Cell, Grupo de Ingeniería y Control de Procesos del ICP – CSIC, www.icp.csic.es/control

[Ion Power, 2010] Sección de membranas de pilas de combustible catalizadas. Ion Power: <http://www.ion-power.com/products.html#graph>.

[Janikow, C.Z. 1998] Janikow, C.Z. (1998) Fuzzy decision trees: Issues and methods. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern., vol. 28, pp. 1–14.

[James L. y Andrew D, 2000] James Larminie; Andrew Dicks. “Fuel Cell Systems Explained”. Ed. John Wiley & Sons, LTD. Year 2000. ISBN 0471490261.

[J. M. de la Cruz, 2006] J. M. de la Cruz, M. Santos, G. Pajares, J.J. Ruz, J. Quesada (2006), Evaluación de técnicas de IA para la toma de decisiones. Nuevas Técnicas en Control Inteligente, Ed. Universidad de Huelva, pp. 7-12.

[Kadyk T. 2009] T. Kadyk, R. Hanke-Rauschenbach, and K. Sundmacher. “Nonlinear frequency response analysis of PEM fuel cells for diagnosis of dehydration, flooding and CO poisoning”. Journal of Electroanalytical Chemistry, 630(1–2); pp:19–27, 2009. [DOI-link: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.02.001>].

[Karner J. y Janocha H., 1996] J. Karner and H. Janocha. *A new method of adapting the parameters of PID controllers*. Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 1996. New Orleans, LA (USA). Volume 3, pages 1800-1806.

[Kevin R. 2006] Kevin R. Minard; V. Viswanathan; Paul D. Majors; Li-Qiong Wang; Peter C. Rieke. “Magnetic resonance imaging (MRI) of PEM dehydration and gas manifold flooding during continuous fuel cell operation”. Journal of Power Source. 161 (2006). pp. 856 – 863.

[Khaled M., 2009] Khaled Mammar, Abdelkader Chaker, FUZZY LOGIC CONTROL OF FUEL CELL SYSTEM FOR RESIDENTIAL POWER GENERATION. Journal of Electrical Engineering, Vol. 60, No. 6, (2009), pp 328–334.

[Klir G.J. y B. Yuan, 1995] Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, G.J. Klir y B. Yuan (1995), Prentice Hall.

[Klir y Folger, 1988] Klir, J. y Folger, T. (1988). *Fuzzy sets uncertainty and information*. Prentice Hall.

[Kordesch K. and Simader G., 1996] K. Kordesch and G. Simader, Fuel Cells and Their Applications; 1 ed.; VCH Verlagsgesellschaft mbH: Weinheim, Germany, 1996.

- [Larmino, J.E, 2000] Larmino, J.E. and Dicks, 2000, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons, Chichester, England.
- [Lee W. K., 1999] W. K. Lee; J. W. Van Zee; S. Shimpalee; S. Dutta. “Effect of humidity on PEM fuel cell performance; part I- Experiments”. Proceedings of the ASME Heat Transfer Div. 364 (1) (1999) 359-366.
- [Macdonald, J. R., 1987] Macdonald, J. R., “Impedance Spectroscopy. Emphasizing solid materials and systems”. Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina. Wiley – Interscience publication, U. S. 1987
- [Mamdani, E. H., 1974] Mamdani, E. H. (1974). Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. *Proceedings of the IEEE*, 121(12):1585–1588.
- [Mamdani, E. H. 1993] Mamdani, E. H. (1993). Twenty years of Fuzzy Control: Experiences Gained and Lessons Learnt. En *Proc. of the IEEE Fuzzy Conference and Neural Networks*, págs. 339–344, San Francisco (USA).
- [Marrony M. 2008] M. Marrony, R. Barrera, S. Quenet, S. Ginocchio. “Durability and lifetime prediction of baseline proton exchange membrane fuel cell under severe operating conditions”, *Journal of Power Sources* 182, (March 2008), pp. 469-475.
- [Margaliot y Langholz, 2000] Margaliot, M. y Langholz, G. (2000). *New approaches to fuzzy modeling and control. Design and analysis*, volumen 38 de *Machine Perception Artificial Intelligence*. World Scientific.
- [Mataric, M. J. 1994] Mataric, M. J. (1994). *Interaction and Intelligent Behavior*. Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology.
- [Mitra, S., 2002] Mitra, S., Konwar, K.M., Pal S.K. (2002) Fuzzy Decision Tree, Linguistic Rules and Fuzzy Knowledge-Based Network: Generation and Evaluation. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern*, vol. 32, pp. 1–12.
- [Natarajan D., 2005] D. Natarajan; T. Van Nguyen. “Current Distribution in PEM Fuel Cells. Part 1: Oxygen and Fuel Flow Rate Effects”. *AICHE Journal*. Volume 51. 2005. Number 9. Pages 2587-2598.
- [NETL, Technical report] Toward a hydrogen economy, Technical report, National Energy Technology Laboratory, <http://www.netl.doe.gov/KeyIssues/hydrogen>.
- [O’Hayre, 2006] O’Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella and Fritz B. Fuel Cell Fundamentals. ISBN: 13 978-0-471-74148-0. 2006, John Wiley & Son, New York.
- [O’Hayre, 2001] O’Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. “Fuel Cell Fundamentals”. Ed. John Wiley & Sons, LTD. Year 2001. ISBN 13978-0-471-74148-0.
- [Ogata K., 1998] Ingeniería de Control Moderna, Katsushiko Ogata. 3ra Edición. ISBN: 970-17-0048-1, (1998).

[Ramschak E. 2006] Erich Ramschak, Volker Peinecke, Peter Prenninger, Thomas Schaffer, Viktor Hacker, “Detection of fuel cell critical status by stack voltage analysis”, *Journal of Power Source* 157 (2006), pp. 837-840.

[Ronald R., 1994] Ronald R. Yager; Dimitar P. Filev. “Essentials Fuzzy Modeling and Control”. Ed. John Wiley & Sons, Inc.

[Rose R., 2009] Robert Rose (recopilador). Preguntas y respuestas sobre el hidrógeno y las pilas de combustible. Observada por última vez el 25 de junio de 2009, en la página web FC2K: <http://www.fuelcells.org/info/library/QuestionsandAnswers062404.pdf>.

[Rubio M.A., 2010] M.A. Rubio; A. Urquía; S. Dormido. “Diagnosis of performance degradation phenomena in PEM fuel cell”. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010). pp. 2586 – 2590.

[Sharon T. y Zalbowitz M. 2009] Sharon Thomas and Marcia Zalbowitz at Los Alamos National Laboratory in Los Alamos, New Mexico. *Fuel Cell – Green Power*, 2009.

[Takagi y Sugeno, 1985] Takagi, T. y Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics*, 15(1):116–132.

[Tecnalia, 2009] Tecnalia Energía. *Hidrógeno y energías renovables. Nuevas tecnologías para la sostenibilidad*. Editado por Tecnalia (Calle Geldo; Edificio 700; 48160; Derio-Bizkaia). Depósito legal: VI-17/06. ISBN: 84-609-8899-6.

[The World Bank, 2010] World Bank Group Progress on Renewable Energy and Energy Efficiency: 2005-2010, Technical report, The World Bank Group, <http://www.worldbank.org>.

[Wang J. T., 1996] J. T. Wang; J. S. Wainright; R. F. Savinell; M. Litt. 1996. “A direct methanol fuel cell using acid-doped polybenzimidazole as polymer electrolyte”. *Journal of Applied Electrochemistry*. Volumen 26, número 7. Páginas 751-756.

[Woo-kum L., 1999] Woo-kum Lee, Chien-Hsien Ho, J. W. Van Zee y Mahesh Murthy. 1999. “The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell”. *Journal of Power Sources*. Volumen 84, número 1. Páginas 45 a 51. [doi:10.1016/S0378-7753\(99\)00298-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00298-0).

[Wahdane B. 2007] B. Wahdane, D. Candusso. François, F. Harel, A. De Bernardinis, J. M. Kauffman, G. Coquery, “Study of a 5kW PEMFC Using Experimental Design and Statical Analysis Techniques”, *Fuel Cells from Fundamentals to System*, vol. 7, Wile-VCH, 2007, pp. 47-62.

[Zadeh, L. A., 1973] Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1:28–44.

[Zadeh, L.A. 1965] Zadeh, L.A. (1965), Fuzzy sets, *Inform. Control*, 8, pp. 338-353.