

# FuelCell-Lib: UNA LIBRERÍA DE MODELADO ORIENTADA A OBJETOS PARA CELDA DE COMBUSTIBLE PEM CON MODELICA

Miguel A. Rubio

IAI-CSIC Ctra. Campo Real, Km. 0,200 - LA POVEDA 28500 ARGANDA DEL REY (Madrid)  
e-mail: marubio@iai.csic.es

A. Urquia\*, A.G.Hombrados, W. Agila, L. González, E. Villanueva, D. Guinea  
IAI-CSIC Ctra. Campo Real, Km. 0,200 - LA POVEDA 28500 ARGANDA DEL REY (Madrid)  
e-mail: {ghalbert, w\_agila, leandrog, eugenio, domingo}@iai.csic.es

\*Departamento de Informática y Automática, UNED, Juan del Rosal, 16, 28040 (Madrid)  
e-mail: {aurquia@dia.UNED.es}

## Resumen

*Los objetivos de desarrollar un modelo físico de celdas de combustible PEM son, en primer lugar, una mayor comprensión de los fenómenos que tienen lugar en esta y en segundo lugar, la mejora de la eficiencia de las celdas de combustible a través de los datos obtenidos de la simulación del modelo.*

*Hasta momento, los modelos de celdas de combustible están desarrollados en lenguajes causales que precisan de gran mantenimiento cuando se realizan mejoras. En este trabajo se muestra el desarrollo de una librería de modelado de celdas de combustible orientada a objetos empleando el lenguaje Modelica. Esta librería permite la fácil actualización y reutilización de sus componentes con un tiempo de desarrollo pequeño.*

**Palabras clave:** Modelado orientado a objetos, celdas de combustible, simulación dinámica, modelos matemáticos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los graves problemas medioambientales que sufrimos en la actualidad unidos a la escasez cada vez mayor de combustibles fósiles, exigen el desarrollo de alternativas energéticas con un menor impacto medioambiental y que permitan mantener el consumo de energía de manera sostenida.

Frente a estos problemas surgen soluciones como las pilas de combustible poliméricas (PEM). Estas son importantes candidatas para sustituir en un periodo de tiempo corto a los motores de explosión, ya que son capaces de producir altas densidades de potencia con gran eficiencia en la conversión energética.

Este sistema de generación eléctrica está considerado como futura fuente de propulsión para los vehículos terrestres y como solución para la generación energética en unidades móviles de potencia media-baja.

El objetivo de la librería desarrollada será mejorar el comportamiento de las celdas de combustible PEM con combustible hidrógeno.

Este artículo está estructurado de la siguiente forma: en primer lugar se mostrará el funcionamiento de la celda de combustible PEM, posteriormente se explica los objetivos del estudio de la simulación, seguidamente se muestra los fenómenos físicos a modelar y las hipótesis de modelado, en el siguiente apartado se desarrollan las ecuaciones fundamentales del modelo. En los últimos apartados se explica el diseño de la librería, los resultados obtenidos con el modelo y finalmente las conclusiones de este trabajo.

## 2 DISEÑO Y OPERACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE PEM

Podemos distinguir dos puntos fundamentales en el estudio de la celda de combustible, que se desarrollan en los siguientes subapartados.

## 2.1 DISEÑO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE PEM

El montaje de la celda está formado por siete partes fundamentales: la capa activa, la capa difusora y los terminales del ánodo y del cátodo y la membrana.

La **membrana** se coloca entre las capas catalíticas del ánodo y del cátodo. A través de ella los protones migran del ánodo al cátodo junto con agua. Las celdas de combustible de intercambio protónico con membrana polimérica generalmente usan como membrana Nafion, que garantiza una elevada conductividad protónica.

El catalizador empleado en la **capa activa** es platino con un porcentaje de rutenio para inhibir el efecto de envenenamiento por monóxido de carbono. Normalmente esta capa catalítica está depositada en la misma superficie de la capa difusora, tanto del ánodo como del cátodo.

Las **capas difusoras** deben estar formadas por material poroso que permita el acceso de los gases y del agua a la capa catalítica. Al mismo tiempo el material difusor debe ser buen conductor, para permitir el movimiento de los electrones entre las placas colectoras y las capas catalíticas. Normalmente suele estar formado por material de carbón, papel o tela, apropiados tanto por sus propiedades conductoras como de su resistencia a la corrosión.

Las **placas colectoras** son de material metálico o carbón no poroso. Sus tres características fundamentales son: la elevada conductividad eléctrica, la capacidad para mantener estanca la celda y la capacidad de permitir la correcta distribución de reactivos a través de los canales.

En la figura 1 se muestra el esquema de las partes que conforman la celda de combustible.

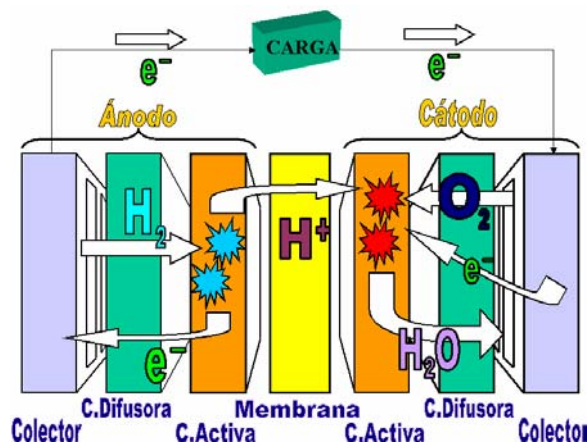
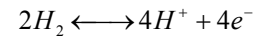


Figura 1: Esquema completo de funcionamiento de celda de combustible PEM

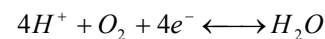
## 2.2 OPERACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE PEM

El hidrógeno se introduce en el ánodo y llega por difusión hasta la capa catalítica del ánodo, donde se produce la reacción electroquímica siguiente:



Los electrones se dirigen hacia la placa colectora del ánodo y llegarán a través de un circuito externo de carga al cátodo. Los protones producidos cruzarán la membrana hacia el cátodo.

En el cátodo se produce la reacción electroquímica siguiente:



El oxígeno, al igual que el hidrógeno en el ánodo, se difunde a través de la capa difusora del cátodo. El oxígeno llega a la capa catalítica también del cátodo. Tres fases reaccionan en el cátodo simultáneamente, primero, los *protones* que provenían del ánodo y que atravesaron la membrana, segundo los *electrones* que se produjeron en el ánodo y que llegaron a la placa colectora del cátodo a través del circuito externo y en tercer lugar el *oxígeno*. El producto de esta reacción será agua, que debe ser administrada adecuadamente, ya que un exceso de esta provocará que el oxígeno no pueda llegar de manera eficiente de las partes activas por encharcamiento. Una desecación excesiva redundaría en una desecación de la membrana polimérica provocando una caída de la conducción protónica.

## 3 OBJETIVO DEL ESTUDIO DEL MODELO

El objetivo del estudio de la simulación realizado de una celda de combustible es doble.

En primer lugar, posibilitar la mejor comprensión de los fenómenos que acaecen en el seno de ésta.

En segundo lugar permitir la mejora de la eficiencia de las celdas a partir de los parámetros fundamentales resultado de este modelo.

Los fenómenos que el modelo reproduce son los siguientes:

- Limitaciones en la cinética interfacial del cátodo. Este fenómeno caracteriza la caída de tensión con pequeñas densidades de corriente.
- Limitación de transporte de masa, el cual produce una caída drástica de la tensión para valores elevados de la densidad de corriente.
- Conductividad protónica en la capa catalítica.
- La posibilidad de que se produzca encharcamiento de los materiales porosos, y la consiguiente

variación en la porosidad. El encharcamiento limita el acceso del gas a las zonas activas.

- Fenómenos de evaporación-condensación de agua en el cátodo y la membrana
- Fenómenos dinámicos asociados a la doble capa de los interfaces los cuales producen una caída del rendimiento por acumulación de agua líquida.

## 4 FENÓMENOS FÍSICOS MODELADOS

El modelo corresponde a una celda de combustible de membrana polimérica (PEMFC).

Los fenómenos físicos considerados en cada región se observan en la figura 2, y son los siguientes:

### Membrana:

- Transporte de agua en fase líquida
- Transporte de agua en fase vapor
- Conducción protónica

### Capa catalítica de cátodo:

- Transporte de agua en fase líquida
- Transporte de agua en fase vapor
- Transporte de oxígeno en forma gaseosa
- Conducción protónica
- Conducción electrónica
- Reacción electroquímica

### Capa difusora de cátodo:

- Transporte de agua en fase líquida
- Transporte de agua en fase vapor
- Transporte de oxígeno en forma gaseosa
- Conducción electrónica.

## 5 HIPÓTESIS DE MODELADO

En el modelo se realizan las siguientes consideraciones y aproximaciones:

- El modelo comprende la membrana la capa catalítica del cátodo y la capa difusora del cátodo.
- La mezcla de gases se consideran una aproximación a los gases ideales.
- La velocidad del flujo y los gradientes de presión de los gases se consideran pequeñas.
- Los electrodos de difusión y capa catalítica tienen una porosidad y una tortuosidad homogénea, con un solo tamaño de poro, correspondiente a las consideraciones del modelo macro-homogéneo[1,2].

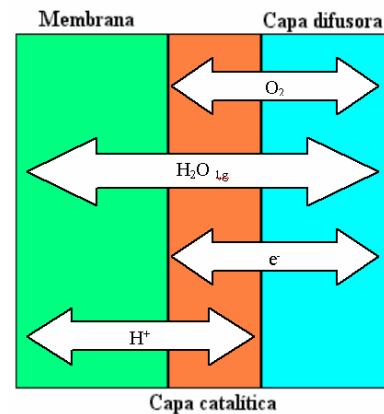


Figura 2: Movilidad las especies en el modelo de cátodo.

- Tanto los electrodos como la capa catalítica y la membrana se consideran isótropos y homogéneos. Esto es equivalente a considerar que el catalizador se encuentra uniformemente distribuido en la capa catalítica.

- El modelo es unidimensional. Las variables varían en dirección ortogonal a la superficie de la membrana y de los electrodos, en este caso el eje x.

- La temperatura de la celda se considera uniforme. No se tiene en cuenta ni el efecto Joule por movimiento de especies ni el calor producido por la reacción electroquímica.

- El movimiento de los gases es debido a gradientes de concentración y de presiones de los gases en los electrodos.

- El sobrepotencial del ánodo se desprecia frente al valor del sobrepotencial catódico.

- El modelo es dinámico y debe ser capaz de representar comportamientos dependientes del tiempo.

- La concentración protónica en el seno de la membrana se considera constante.

- La membrana se considera totalmente hidratada a efectos de la conducción protónica [7], y no se considera efectos de crossover de los gases en la membrana.

## 6 ECUACIONES DE MODELO

Las ecuaciones del modelo están divididas en tres partes, que corresponden a las tres partes físicas fundamentales del modelo.

## 5.1 CAPA DIFUSORA

- Balance de gas  $O_2$

$$\frac{p_{O_2}}{RT} \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\varepsilon_g}{RT} \frac{\partial p_{O_2}}{\partial t} = - \frac{dJ_{O_2}}{dx} \quad (1)$$

Donde  $\varepsilon_g$  es el volumen de poro del material difusor,  $p_{O_2}$  y  $J_{O_2}$  son las presiones y flujos de oxígeno respectivamente.

- Balance de gas  $H_2O$

$$\frac{p_{H_2O}}{RT} \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\varepsilon_g}{RT} \frac{\partial p_{H_2O}}{\partial t} = - \frac{dJ_{H_2O}^g}{dx} - \frac{\alpha_v \beta}{RT} (p_{H_2O} - p_{H_2O}^{sat}) \quad (2)$$

Los términos  $p_{H_2O}$  y  $J_{H_2O}^g$  son la presión y flujo de agua en fase vapor respectivamente.

En las ecuaciones de balance de agua aparece un término que relaciona la condensación y la evaporación del agua. Se considera que las dos fases se encuentran en equilibrio, dependiendo de la superficie específica del material difusor.

- Balance de  $H_2O$  líquida

$$\frac{\rho_s}{M_{H_2O}} \frac{\partial \chi_s}{\partial t} = - \frac{dJ_{H_2O}^l}{dx} + \frac{\alpha_v \beta}{RT} (p_{H_2O} - p_{H_2O}^{sat}) \quad (3)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del sólido y  $M_{H_2O}$  es la masa molar del agua,  $\chi_s$  y  $J_{H_2O}^l$  son la carga y el flujo de agua líquida respectivamente.

- Transporte de gases

$$\frac{\varepsilon_g}{\tau^2} \frac{dp_i}{dx} = \sum_{k=1}^i \frac{RT}{p_c D_{ik}} (p_i N_k - N_i p_k) + \frac{RT J_j}{\frac{\varepsilon_g}{\tau^2} D_j} \quad (4)$$

El término  $\tau$  representa la tortuosidad del material difusor,  $p_c$  es la presión total y  $D_{ik}$  es el coeficiente binario de difusión.

La ec.(4) muestra el flujo de los gases en función de dos fenómenos: el gradiente de concentraciones, difusión de Stefan-Maxwell, y por gradiente de presión total, difusión Knudsen.

- Transporte de  $H_2O$  líquida

$$J_{H_2O}^l = - \frac{\rho_s}{M_{H_2O}} D_{H_2O} \frac{d\chi_s}{dx} \quad (5)$$

Donde el término  $D_{H_2O}$  corresponde al coeficiente de difusión del agua líquida en el material difusor.

Se considera que el flujo de agua líquida está producido por un gradiente de carga de agua líquida. Así mismo, se supone que la difusión superficial es predominante [4].

- Conducción electrónica

$$J_e = -\sigma_s \varepsilon_s \frac{dV_s}{dx} \quad (6)$$

Donde  $V_s$  es la tensión del sólido,  $J_e$  la corriente electrónica y  $\sigma_s$  es la conductividad electrónica del medio sólido.

La conducción electrónica depende de la conductividad del sólido difusor y de la porosidad del medio poroso.

## 5.2 CAPA CATALITICA

- Balance de gas  $O_2$

$$\frac{p_{O_2}}{RT} \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\varepsilon_g}{RT} \frac{\partial p_{O_2}}{\partial t} = - \frac{dJ_{O_2}}{dx} - \frac{1}{4F} \frac{dJ_e}{dx} \quad (7)$$

El término derecho de la ecuación constituye el balance de oxígeno en la capa catalítica. El último término representa el efecto de la reacción electroquímica.

- Balance de gas  $H_2O$

$$\frac{p_{H_2O}}{RT} \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\varepsilon_g}{RT} \frac{\partial p_{H_2O}}{\partial t} = - \frac{dJ_{H_2O}^g}{dx} + \frac{1}{2F} \frac{dJ_e}{dx} - \frac{\alpha_v \beta}{RT} (p_{H_2O} - p_{H_2O}^{sat}) \quad (8)$$

En esta expresión, al igual que en la ec.(7), el balance de agua en la capa catalítica depende de la reacción electroquímica.

- Balance de  $H_2O$  líquida

$$\frac{\rho_s}{M_{H_2O}} \frac{\partial \chi_s}{\partial t} = - \frac{dJ_{H_2O}^l}{dx} + \frac{\alpha_v \beta}{RT} (p_{H_2O} - p_{H_2O}^{sat}) \quad (9)$$

- Transporte de gases

$$\frac{\varepsilon_g}{\tau^2} \frac{dp_i}{dx} = \sum_{k=1}^i \frac{RT}{p_c D_{ik}} (p_i N_k - N_i p_k) + \frac{RT J_j}{\frac{\varepsilon_g}{\tau^2} D_j} \quad (10)$$

- Transporte de  $H_2O$  líquida

$$J^l_{H_2O} = -\frac{\rho_s}{M_{H_2O}} D_{H_2O} \frac{d\chi_s}{dx} + n_{drag} \frac{J_p}{F} \quad (11)$$

El flujo de agua líquida depende del gradiente de concentración de agua líquida y del arrastre electrosmótico asociado a la conducción protónica de la membrana alojada en la capa activa. La expresión del coeficiente de arrastre electrosmótico se expresa en la ec.(25). Esta ecuación también es válida para el arrastre electrosmótico en la membrana.

- Conducción protónica

$$J_p = -K_p \varepsilon_m \frac{dV_e}{dx} \quad (12)$$

Donde  $V_e$  representa la tensión en el electrolito,  $J_p$  la corriente protónica,  $K_p$  la conductividad protónica y  $\varepsilon_m$  el volumen de material de electrolito. La conducción protónica está producida por un gradiente de potencial en el material conductor protónico.

- Conducción electrónica

$$J_e = -\sigma_s \varepsilon_s \frac{dV_s}{dx} \quad (13)$$

- Reacción electroquímica

$$\nabla J_e = a_{act} i_0 \left[ \frac{p_{O_2}}{p^0_{O_2}} \exp\left(\frac{cnF}{RT} \eta_D\right) - \exp\left(\frac{-1(1-\alpha)nF}{RT} \eta_D\right) \right] \quad (14)$$

Donde  $i_0$  es la corriente de intercambio a circuito abierto,  $a_{act}$  es la superficie específica activa de la capa catalítica,  $p^0_{O_2}$  es la presión parcial de referencia de oxígeno,  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia de carga catódica y  $\eta_D$  es el sobrepotencial entre el sólido y el electrolito. La ec.(14) es la expresión de Butler-Bolmer de la reacción electroquímica. En ella, la contribución correspondiente al ánodo se puede considerar despreciable[4,5,6].

Las características propias del modelo macro-homogéneo hacen subestimar el efecto de sobrepotencial asociado al defecto de masa en altas densidades de corriente. Para caracterizar este fenómeno introducimos en el modelo las ec. (14a, b, c).

$$i_o = i^{ref}_o \left( 1 - \frac{J_e}{J_l} \right) \quad (14a)$$

$$J_l = \left( \frac{p_{O_2}}{p^0_{O_2}} \right) J_{lim} \quad (14b)$$

$$J_{lim} = \frac{AD_{effO_2}}{\delta} \quad (14c)$$

Donde A es la superficie activa de la capa catalítica,  $\delta$  en el caso del modelo macro-homogeneo correspondería a la anchura de la capa catalítica [9].

### 5.3 MEMBRANA

- Balance de gas  $H_2O$

$$\frac{p_{H_2O}}{RT} \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\varepsilon_g}{RT} \frac{\partial p_{H_2O}}{\partial t} = -\frac{dJ^g_{H_2O}}{dx} - \frac{\alpha_v \beta}{RT} (p_{H_2O} - p^{sat}_{H_2O}) \quad (15)$$

- Balance de  $H_2O$  líquida

$$\frac{\rho_s}{M_{H_2O}} \frac{\partial \chi_s}{\partial t} = -\frac{dJ^l_{H_2O}}{dx} + \frac{\alpha_v \beta}{RT} (p_{H_2O} - p^{sat}_{H_2O}) \quad (16)$$

- Transporte de  $H_2O$  líquida

$$J^l_{H_2O} = -\frac{\rho_s}{M_{H_2O}} D_{H_2O} \frac{d\chi_s}{dx} + n_{drag} \frac{J_p}{F} \quad (17)$$

- Transporte de  $H_2O$  gaseosa

$$J^g_{H_2O} = -\frac{\tau^2 RT}{\varepsilon_g} D^g_{H_2O} \frac{dp_{H_2O}}{dx} \quad (18)$$

- Transporte protónico

$$J_p = -K_p \varepsilon_m \frac{dV_e}{dx} \quad (19)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{g0} \left[ 1 - \left( \frac{\chi_s}{\chi_s^{max}} \right)^m \right] \quad (20)$$

El volumen de poro de la ec.(20) viene determinada por la carga de agua del material poroso.

$$\chi_s^{max} = \frac{\rho^l_{H_2O} (1 - \varepsilon_s - \varepsilon_e)}{\rho_s \varepsilon_s} \quad (21)$$

La carga máxima de agua del material poroso viene determinada por el volumen de poro, en el caso de la

capa difusora no existiría la parte correspondiente al volumen de material de electrolito.

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_{g_0} - \varepsilon_e \quad (22)$$

$$p_{H_2O}^{sat} = p_0^{sat} e^{\left(\frac{1}{T^{sat_0}} - \frac{1}{T}\right) \frac{L_v M_{H_2O}}{R}} \quad (23)$$

$$L_v = 1.73287 \times 10^6 + 1.03001 \times 10^{-4} T - 4.47755 \times 10^{-1} T^2 + 7.6629 \times 10^{-2} T^3 - 5.5058 \times 10^{-5} T^4 \quad (24)$$

Las ec.(23-24) representan el cálculo de la presión de saturación, que depende esencialmente de la temperatura.

$$n_{drag} = \frac{2.5 L_{SO_2} \varepsilon_e}{22} \quad (25)$$

La ec.(25) está determinada experimentalmente depende del contenido de agua de la membrana [2].

## 6 DISEÑO DE LA LIBRERÍA

El modelo físico está implementado en Modelica, que es un lenguaje de modelado físico orientado a objetos, para modelar sistemas grandes, complejos y multidominio. Los modelos en Modelica pueden estar descritos mediante ecuaciones diferenciales ordinarias, ecuaciones algebraico-diferenciales, ecuaciones discretas y bond-graph, entre otros [10,12], permitiendo obtener los resultados de la simulación de las ecuaciones desarrolladas anteriormente.

El entorno de modelado empleado es DYMOLA, que cuenta con un entorno amigable de simulación y un interfaz gráfico que facilita su manejo.

Las ecuaciones diferenciales se resuelven mediante el método de volúmenes finitos, como puede observarse en la figura 3.

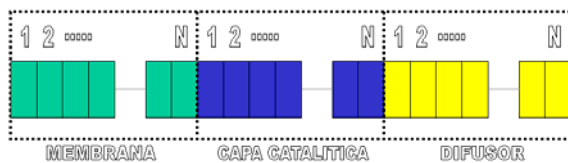


Figura 3: Esquema del método de resolución por volúmenes finitos

### 6.1 METODOLOGÍA DE MODELADO

La librería de **FuelCell-Lib** se desarrolla con una metodología de modelado orientado a objetos, donde se pueden observar los siguiente puntos [11]:

#### **Diseño del interfaz:**

Los interfaces del modelo tienen las siguientes propiedades:

- En la librería, todas las clases diseñadas tienen el mismo interfaz, permitiendo que las clases puedan ser intercambiables.
- Todos los conectores de los interfaces de la librería comparten las mismas variables, de esta manera no se restringe la conectividad de las clases.

#### **Descripción interna:**

El modelado de los fenómenos de cada clase satisfacen las condiciones impuestas por el interfaz, así mismo en este apartado del diseño se proponen las características propias de cada clase.

### 6.2 CLASES PRINCIPALES

Se desarrollaron dos grandes grupos de clases :

#### **Volúmenes de control:**

En esta clase se representan las ecuaciones de conservación de las variables del modelo.

#### **Fenómenos de transporte:**

Este grupo de clase representa las ecuaciones de transporte de las especies del modelo.

Tanto las clases de *volúmenes de control* como en las clases de *fenómenos de transporte* vendrán representadas en cada capa física del modelo.

### 6.3 JERARQUIZACIÓN Y ESTRUCTURA ORIENTADA A OBJETOS

La estructura del modelo es jerárquica y orientada a objetos, esencial para su reutilización. Inicialmente se diseñó el puerto, con características comunes a todas las clases del modelo, siguiendo por el diseño de las clases de volumen de control y fenómenos de transporte. Estas clases representan las ecuaciones de conservación y fenómenos de transporte respectivamente, cada uno con características propias de la capa que estamos definiendo. Volumen de control y volumen de transporte formarán en cada región de estudio una nueva clase, que será el volumen mínimo. El conjunto de volúmenes mínimos se unirán formando un volumen completo de cada capa. Cada capa se unirá al resto para completar el modelo de la celda de combustible. El esquema de esta jerarquización podemos observarla en la figura 4.

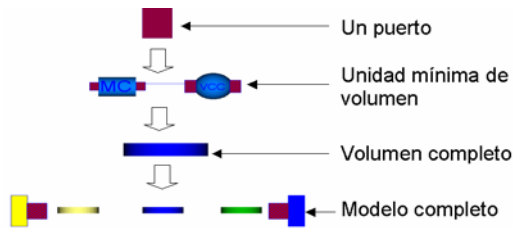


Figura 4: Esquema jerárquico del modelo.

La estructura jerárquica del modelo permitirá la reutilización del modelo, de tal manera que la ampliación del modelo de la semicelda a un modelo de la celda completa será posible de manera sencilla, cambios en hipótesis de modelado serán implementadas con facilidad gracias a la estructura jerárquica del diseño.

Los algoritmos de resolución empleado por Dymola para resolver las ecuaciones diferenciales son los algoritmos DASSL, usando métodos de integración de paso variable, con capacidad para resolver modelos stiff.

## 7 RESULTADOS

Los resultados de la simulación se observa una concordancia con los resultados obtenidos en otros modelos y datos experimentales. En la figura 5a podemos observar la dependencia de la presión de oxígeno en el cátodo en función de la corriente. En la figura 5b se observa que el modelo de K.Broka [6] tiene un comportamiento similar a nuestro modelo.

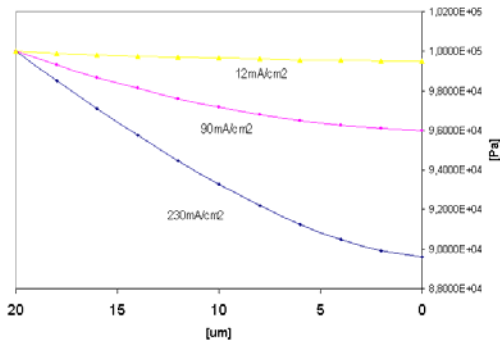


figura 5a: Presión de oxígeno en función de la posición de la zona catalítica para diferentes densidades de corriente ( $2 \times 10^5$  Pa de  $O_2$ ,  $340^\circ K$ ).

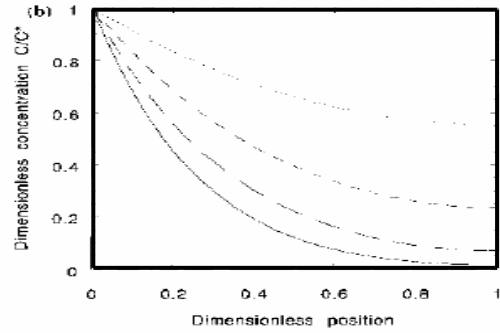


Figura 5b: Concentración de oxígeno en el cátodo en el eje x según el modelo de K.Broka, (.....)250, (- - -) 500, ( \_ \_ \_ ) y ( \_ \_ \_ ) 1000 mA  $cm^2$ .

En la figura 6 se observa la influencia de la pendiente de tafel.

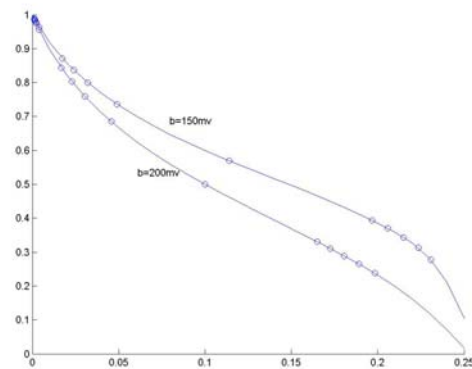


Figura 6: dependencia de la curva de polarización con la pendiente de tafel (B).

En la figura 7 se observa la concordancia de los resultados experimentales con los datos obtenidos de la simulación.

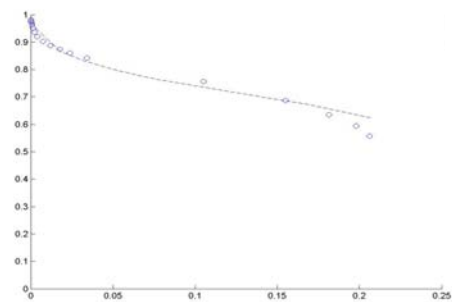


Figura 7: contraste experimental de curva de polarización con los resultados del modelo, exp (o), modelo (- -), ( $2 \times 10^5$  Pa de  $O_2$ ,  $340^\circ K$ ).

En la figura 8 se muestra la carga de agua en la membrana y en la capa catalítica en función del eje x. Puede observarse la producción de agua en la capa catalítica y la difusión lineal del agua través de la

membrana. La distancia entre 0-50 $\mu\text{m}$  corresponde a la membrana y entre 50-70 $\mu\text{m}$  a la capa catalítica. Las condiciones de contorno en los extremos es que la carga de agua sea nula.

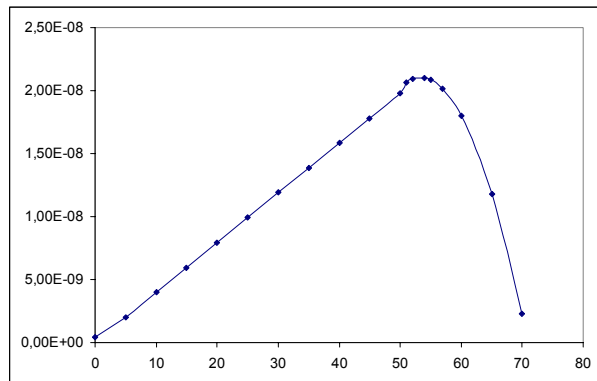


Figura 8: Carga de agua en cátodo a lo largo del eje x.

Los datos experimentales fueron tomados en el Instituto de Automática Industrial del CSIC. Las celdas de combustible con las que se han obtenido los datos experimentales se han diseñado en el Instituto de Automática Industrial del CSIC.

## 8 CONCLUSIONES

La librería *FuelCell-Lib* es una librería de Modelica que cumple los objetivos de conectividad y reutilización.

Como se ha podido observar en el apartado 7, el modelo nos da información valiosa sobre los fenómenos físicos que suceden en la celda de combustible.

La información obtenida con esta librería nos permite mejorar la eficiencia de las celdas de combustible con los parámetros más significativos obtenidos de la simulación.

## 9 TRABAJOS FUTUROS

En trabajos posteriores se estudiarán con detalle variables internas de la celda no mensurables experimentalmente y sin embargo de gran importancia para comprender los fenómenos fundamentales acaecidos en el seno de esta.

Se debe hacer un esfuerzo en identificar algunos de los parámetros del modelo correspondientes a propiedades físicas de algunas de las partes de la celda y que precisan un fuerte trabajo experimental.

En futuros trabajos se mostrarán los resultados en la dinámica de la celda de combustible obtenidos con esta librería.

## Referencias

- [1] D.M.Bernardi, M.W.Verbrugge, J. electrochem. Soc. 139,9 (1992).
- [2] T.E.Springer, T.A.Zawodzinski, and S. Gottesfeld, J. electrochem.Soc.138,8 (1991).
- [3] P.Björnbom, Electrochim.Acta 32,1 (1987).
- [4] D.Bevers, M.Wöhr, K.Yasuda, K.Oguro, J.Appl. Electrochem.27 (1997).
- [5] M.Ceraolo, C.Miulli, A.Pozio, J. Power Sources 113 (2003).
- [6] K.Broka, P.Ekdunge, J.Appl. Electrochem.27 (1997).
- [7] A.Rowe, X.Li, J. Power Sources 102 (2001).
- [8] K.Dannenbergh, P.Ekdunge, G.Lindbergh, J.Appl. Electrochem.30 (2000).
- [9] D.B.Genevey, Thesis, F.V.P.I. (2001)
- [10] Modelica Association, Modelica-A Unified Object-Oriented Language for Physical System Modeling, Tutorial. <http://www.modelica.org/>.
- [11] A.Urquia, S.Dormido, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, vol.9, n°1, pp.65-90, (2002).
- [12] K.J.Aström, H.Elmqvist, S.E.Mattsson, Evolution of continuous-time modeling and simulation, The 12<sup>th</sup> ESM'98, (1998)