



Máster en ingeniería de sistemas y control

# **Análisis de la eficacia de las pilas de combustible PEM, mediante modelado y simulación**

Del estudiante: Enrique Martínez Varas

Dirigido por: Miguel Ángel Rubio González

Curso académico 2011 – 2012, convocatoria de junio.



Máster en ingeniería de sistemas y control

# **Análisis de la eficacia de las pilas de combustible PEM, mediante modelado y simulación**

Proyecto de modelado matemático y simulación de sistemas físicos.

Del estudiante: Enrique Martínez Varas

Dirigido por: Miguel Ángel Rubio González





## Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado: Enrique Martínez Varas.

Firma del alumno

## Resumen del proyecto

En este trabajo se analiza el comportamiento de una célula PEM aislada, desde el punto de vista de una variada cantidad de sus parámetros. Este análisis sirve especialmente para facilitar la comprensión del funcionamiento de este tipo de células galvánicas. Además provee con un modelo ampliamente caracterizable y con el que profundizar en el conocimiento y resolver dudas sobre este tipo de células galvánicas. La obra se divide en tres capítulos.

En el primer capítulo se aborda el modelado matemático del cátodo de la célula, y se hace uso de ese modelo para la elaboración de varios análisis. Concretamente se estudia la evolución de la curva de polarización, del encharcamiento y del defecto de masa en función de la variación uno a uno de una gran variedad de parámetros.

En el segundo capítulo se añade al modelo la fenomenología térmica asociada a las pilas. También se incluye el arrastre electroosmótico. El modelado de la dinámica térmica se divide en generación y transporte. Dentro del transporte están la conducción y la convección, y dentro de la generación están las pérdidas por activación, por efecto Joule y por transición de estado del agua. También se modela someramente el efecto disipativo de los colectores.

En el tercer capítulo se desarrolla el modelado del ánodo, completándose con ello las piezas más importantes de una célula PEM. Para tal fin, se emplea la estructura que tiene el cátodo, pero con sus particularidades y parámetros. También se aborda el modelado de los colectores pero conteniéndolos todavía en el modelo "terminales". En este aspecto se han incluido tanto las presiones de todos los gases, como la variación de la carga de agua en función de la presión de vapor, o la refrigeración de los colectores mediante circulación forzada de un fluido, en este caso el aire.

Quedarían por tratar elementos como la independencia de los colectores o la interdependencia no modelada entre algunos parámetros. Eso son futuras líneas de trabajo.

## Lista de palabras clave

Análisis		(15,25,29,32,35,39,48,51,53,56,65,82,90,98,102)
Área		(27,44)
Balance -	Térmico	(59,93)
Calor -	Específico	(71,82,89)
Capa -		(27,32,46)
	Membrana	(23,62,98)
	Catalítica	(24,38,40,41,42,43,63,94)
	Difusora	(25,64,95)
	Colector	(64,97)
	Ánodo	(96)
Carga -	Resistiva	(122,128)
Cátodo		(17,27,46,68,100)
Conclusiones		(55,89,128)
Conducción -	Eléctrica	(18,58,92)
	Térmica	(84)
Conductividad -	Eléctrica	(29,30,59,67)
	Térmica	(75,82,89)
Convección		(59,60,86,89,93)
Curva -	Polarización	(26,28,29,30,65,67,69,70,71,98)
	Potencia	(32,67,101,117,120,121,122,125)
Defecto -	Masa	(32,34,36,38,40,41,43,44,72,74,75, 81,82,117,120,121,122)
Difusión -		(17,91)
	Coefficiente	(40,41,43,49,50,52)
Disipación -	Térmica	(61,68,74,80,84,93)
Encharcamiento		(46,48,49,50,76,77,78,80, 82,109,112,114,116)
Estructura		(16,61,90)
Generación -	Eléctrica	(27,102)
Hidratación		(67,74,78,103,112,120,128)
Modelado -	Matemático	(16,56,90)
	Del cátodo	(16)
	Térmico	(56)
	Del ánodo	(90)
Parámetros		(22,25,32,46,61,65,72, 76,93,96,109,117)
Porosidad -	Sólido	(36,48)
	Electrolito	(38)
Potencia		(32,67,83,100,116,123,125,126)
Potencial -	Nernst	(56,92)
Presión -	Oxígeno	(34,72,74)
	Gases	(67,74,80,89,90,92,105, 107,109,119,121,126)
Reacción -	Electroquímica	(18,56,92)
Refrigeración		(105,114,123,128)
Solvatación		(59,111)
Tafel		(28,102)
Temperatura		(60,74,77,80,84,93,101, 116,121,123,126)
Transición -	De estado	(18,87)

## **Índice del documento**

**Resumen del proyecto**

**Lista de palabras clave**

**Índice**

**Lista de figuras y tablas**

## **1 Introducción**

**1.1 MODELICA en entorno DYMOLA**

**1.2 Células de combustible**

**1.3 Objetivos y organización**

## **2 Análisis mediante modelado del cátodo**

**2.1 Introducción**

**2.2 Modelado matemático**

**2.2.1 Estructura del modelo**

**2.2.2 Difusión de 2 gases y un líquido en un medio poroso**

**2.2.3 Conducción eléctrica y reacción electroquímica**

**2.2.4 Ensamblado del modelo y valores de los parámetros**

**2.3 Análisis del modelo**

**2.3.1 La curva de polarización en función de diversos parámetros**

*2.3.1.1 Variación en función de la anchura de capa*

*2.3.1.2 Variación en función de la densidad de generación eléctrica*

*2.3.1.3 Variación en función de la pendiente de Tafel*

*2.3.1.4 Variación en función de la conductividad electrónica*

*2.3.1.5 Variación en función de la conductividad protónica*

*2.3.1.6 La curva de potencia*

### **2.3.2 El defecto de masa en función de diversos parámetros**

*2.3.2.1 Variación en función de la anchura de capa*

*2.3.2.2 Variación en función de la presión de oxígeno*

*2.3.2.3 Variación en función de la fracción de sólido  $\varepsilon_s$  en la capa catalítica*

*2.3.2.4 Variación en función de la porosidad de electrolito  $\varepsilon_e$  en la capa catalítica*

*2.3.2.5 Variación en función del coeficiente binario de difusión en la capa catalítica*

*2.3.2.6 Variación en función del coeficiente Knudsen de difusión del oxígeno en la capa catalítica*

*2.3.2.7 Variación en función del coeficiente Knudsen de difusión del vapor de agua en la capa catalítica*

*2.3.2.8 Variación en función del área de pila*

### **2.3.3 El encharcamiento del cátodo en función de diversos parámetros**

*2.3.3.1 Variación en función de la anchura de capa*

*2.3.3.2 Variación en función de la porosidad del sólido  $\varepsilon_s$*

*2.3.3.3 Variación en función del coeficiente Knudsen de difusión del vapor de agua*

*2.3.3.4 Variación en función del coeficiente de difusión del agua líquida*

### **2.3.4. Un caso especial: Breve análisis de una pila con coeficientes de difusión menores**

## **2.4 Resumen y conclusiones**

## **3 Análisis mediante modelado térmico**

### **3.1 Introducción**

### **3.2 Modelado matemático**

#### **3.2.1 Reacción electroquímica y potencial de Nernst**

#### **3.2.2 Conducción eléctrica**

#### **3.2.3 Balance térmico**

#### **3.2.4 Disipación térmica**

#### **3.2.5 Ensamblado del modelo y valores de los parámetros**

### **3.3 Análisis del modelo**

#### **3.3.1 La curva de polarización en función de diversos parámetros**

##### *3.3.1.1 Curva de polarización original*

##### *3.3.1.2 Curva de potencia original*

##### *3.3.1.3 Variación en función de la hidratación a través de la conductividad protónica*

##### *3.3.1.4 Variación en función de la temperatura de disipación*

##### *3.3.1.5 Variación en función de la conductividad térmica*

##### *3.3.1.6 Variación en función del calor específico*

#### **3.3.2 El defecto de masa en función de diversos parámetros**

##### *3.3.2.1 Defecto de masa original*

##### *3.3.2.2 Defecto de masa en función de la hidratación*

##### *3.3.2.3 Defecto de masa en función de la temperatura de disipación*

##### *3.3.2.4 Defecto de masa en función de la conductividad térmica*

##### *3.3.2.5 Defecto de masa en función del calor específico*

#### **3.3.3 Encharcamiento en función de diversos parámetros**

##### *3.3.3.1 Encharcamiento original*

*3.3.3.2 Variación en función de la hidratación*

*3.3.3.3 Variación en función de la temperatura de disipación*

*3.3.3.4 Variación en función de la conductividad térmica*

*3.3.3.5 Variación en función del calor específico*

### **3.3.4 El efecto refrigerante**

*3.3.4.1 Variación del PPM en función de la temperatura de disipación*

*3.3.4.2 Influencia de la conducción*

*3.3.4.3 Influencia de la convección*

*3.3.4.4 Influencia de la transición de estado del agua*

## **3.4 Resumen y conclusiones**

# **4 Análisis mediante modelado del ánodo**

## **4.1 Introducción**

## **4.2 Modelado matemático**

**4.2.1 Estructura del modelo**

**4.2.2 Difusión de las especies**

**4.2.3 Reacción electroquímica**

**4.2.4 Humectación de la pila**

**4.2.5 Disipación y balance térmicos**

**4.2.6 Ensamblado del modelo y valores de los parámetros**

## **4.3 Análisis del modelo**

**4.3.1 La curva de polarización en función de diversos parámetros**

*4.3.1.1 Curva de polarización original*

*4.3.1.2 Curva de potencia original*

*4.3.1.3 Variación en función de la pendiente de Tafel*

*4.3.1.4 Variación en función de la densidad de generación*

*4.3.1.5 Variación en función de la humectación*

*4.3.1.6 Variación en función de la refrigeración*

*4.3.1.7 Variación en función de las presiones de los gases*

**4.3.2 Encharcamiento y secado en función de diversos parámetros**

*4.3.2.1 Encharcamiento original*

*4.3.2.2 Variación en función del coeficiente de solvatación del hidrógeno*

*4.3.2.3 Variación en función de la humectación*

*4.3.2.4 Variación en función de la refrigeración*

*4.3.2.5 Variación en función de la carga*

**4.3.3 El defecto de masa en función de diversos parámetros**

*4.3.3.1 Defecto original*

*4.3.3.2 Defecto de masa en función de la humectación*

*4.3.3.3 Defecto de masa en función de la refrigeración*

*4.3.3.4 Defecto de masa en función de la carga*

**4.3.4 Colectores y variables macroscópicas**

*4.3.4.1 Potencia y temperatura en función de la refrigeración*

*4.3.4.2 Potencia y temperaturas en función de la humectación*

*4.3.4.3 Potencia y temperaturas en función de las presiones de los gases*

**4.4 Resumen y conclusiones**

**Lista de referencias y bibliografía**

**Listado de siglas, abreviaturas y acrónimos**

**Anexo A Código de la librería**

**Anexo B Extensiones de cálculo**

**Agradecimientos**

## Lista de figuras y tablas

- Figura 1 Ejemplo de conexión de los elementos finitos para crear un modelo de pila
- Figura 2 Evolución del cálculo de los sobrepotenciales a lo largo de la pila (valor absoluto)
- Figura 3 El sobrepotencial total
- Figura 4 Potencial eléctrico de la pila (fuerza electromotriz)
- Figura 5 Potenciales electrónico y protónico
- Figura 6 Curva de polarización en función de la longitud de las capas
- Figura 7 Influencia de los sobrepotenciales
- Figura 8 Curva de polarización en función de la densidad de generación eléctrica
- Figura 9 Polarización en función de la pendiente de Tafel
- Figura 10 Polarización en función de la conductividad electrónica
- Figura 11 polarización en función de la conductividad protónica
- Figura 12 Contribución al sobrepotencial de la membrana y la catalítica
- Figura 13 Curva de potencia
- Figura 14 Defecto de masa en función de la longitud de las capas, en el área catalítica
- Figura 15 Defecto de masa en función de la presión absoluta del oxígeno
- Figura 16 Polarización en función de la presión de oxígeno
- Figura 17 Defecto de masa en la capa catalítica
- Figura 18 Polarización en función de la fracción de sólido
- Figura 19 Defecto de masa en función de  $\varepsilon_c$
- Figura 20 Polarización en función de la fracción de electrolito
- Figura 21 Defecto de masa a lo largo de la capa catalítica
- Figura 22 Polarización en función del coeficiente de difusión binario
- Figura 23 Defecto de masa en la capa catalítica, en función del coeficiente de difusión del oxígeno
- Figura 24 polarización en función del coeficiente Knudsen del oxígeno
- Figura 25 Defecto de masa a lo largo de la capa catalítica
- Figura 26 polarización en función del coeficiente de difusión del vapor de agua
- Figura 27 Defecto de masa en función del área
- Figura 28 Polarización en función del área
- Figura 29 Comparación de los sobrepotenciales en las tres pilas
- Figura 30 FEM en función de la longitud de las capas
- Figura 31 FEM en función de la fracción de sólido
- Figura 32 Flujos en función de la porosidad del sólido
- Figura 33 FEM en función del coeficiente de difusión del vapor de agua
- Figura 34 FEM en función del coeficiente de difusión del agua líquida
- Figura 35 Flujos en las fronteras de la capa catalítica
- Figura 36 Curva de polarización con coeficientes de difusión mucho menores
- Figura 37 Curva de potencia
- Figura 38 Presión de vapor
- Figura 39 Defecto de masa
- Figura 40 Solvatación del hidronio
- Figura 41 Curva de polarización
- Figura 42 Polarización en escalones
- Figura 43 Carga de agua en la catalítica
- Figura 44 Curva de potencia
- Figura 45 Polarización en función de la hidratación
- Figura 46 Curva de polarización en función de la temperatura de disipación
- Figura 47 Curva de polarización en función de la conductividad térmica

Figura 48 Gradiente de temperatura en el interior de la capa catalítica  
 Figura 49 Flujo térmico conductivo entregado a los colectores  
 Figura 50 Curva de polarización en función del calor específico  
 Figura 51 El defecto de masa  
 Figura 52 Transitorios de tensión  
 Figura 53 Transitorios de presión  
 Figura 54 Defecto de masa en función de la humedad relativa  
 Figura 55 Defecto de masa en función de la temperatura de disipación  
 Figura 56 Defecto de masa en función de la conductividad térmica  
 Figura 57 Defecto de masa en función del calor específico de los materiales  
 Figura 58 Carga de agua relativa, a lo largo de la capa catalítica  
 Figura 59 LLenado de las primeras capas  
 Figura 60 Carga de agua relativa en el volumen 22  
 Figura 61 Carga de agua relativa en el volumen 33  
 Figura 62 Carga de agua relativa en el volumen 40  
 Figura 63 Carga de agua relativa en el volumen 22  
 Figura 64 Carga de agua relativa en el volumen 33  
 Figura 65 Carga de agua relativa en el volumen 40  
 Figura 66 Encharcamiento en función de la conductividad térmica  
 Figura 67 Encharcamiento en función del calor específico  
 Figura 68 Influencia de la temperatura en el PPM  
 Figura 69 Flujos conductivos  
 Figura 70 Rendimiento de la célula  
 Figura 71 Flujos convectivos  
 Figura 72 Calor de evaporación en la catalítica  
 Figura 73 Calor de evaporación en la membrana y la difusora  
 Figura 74 Estructura del modelo  
 Figura 75 Curva de polarización original  
 Figura 76 Curva de polarización en escalones  
 Figura 77 Curva de potencia  
 Figura 78 Rendimiento de la pila  
 Figura 79 Curva de polarización en función de la pendiente de Tafel  
 Figura 80 Curva de polarización en función de la densidad de generación  
 Figura 81 Curva de polarización en función de la hidratación  
 Figura 82 Evolución de la tensión de la pila  
 Figura 83 Curva de polarización en función de la refrigeración  
 Figura 84 Efecto de la refrigeración con tiempos largos  
 Figura 85 Curva de polarización en función de la presión de oxígeno  
 Figura 86 Curva de polarización en función de la presión de hidrógeno  
 Figura 87 Polarización en escalones de la pila  
 Figura 88 Encharcamiento del cátodo  
 Figura 89 Encharcamiento del ánodo  
 Figura 90 Variación del encharcamiento de las fronteras del ánodo en función del coeficiente de solvatación  
 Figura 91 Variación del encharcamiento de las fronteras del cátodo en función del coeficiente de solvatación  
 Figura 92 Polarización en escalones en función de la presión de vapor  
 Figura 93 Variación de la carga de agua en las fronteras del ánodo  
 Figura 94 Conductividad protónica de la membrana en función de la presión de vapor.  
 Figura 95 Polarización en escalones en función del caudal refrigerante  
 Figura 96 Evolución de la temperatura del colector anódico  
 Figura 97 Encharcamiento en el ánodo

Figura 98 Encharcamiento del cátodo  
Figura 99 Evolución de la tensión de la pila  
Figura 100 Presión de oxígeno en el cátodo  
Figura 101 Evolución de las presiones de oxígeno a lo largo del cátodo  
Figura 102 Presión de hidrógeno en el ánodo  
Figura 103 Evolución de las presiones de hidrógeno a lo largo del ánodo  
Figura 104 Evolución de las presiones a lo largo del cátodo  
Figura 105 Evolución de las presiones a lo largo del ánodo  
Figura 106 Evolución de la presión a lo largo del cátodo  
Figura 107 Evolución de la presión en el ánodo  
Figura 108 Evolución de las presiones a lo largo del cátodo  
Figura 109 Evolución de las presiones a lo largo del ánodo  
Figura 110 Curvas de potencia y polarización  
Figura 111 Curvas de potencia en función del caudal refrigerante  
Figura 112 Distribución espacial de la temperatura  
Figura 113 Curva de potencia en función de la humectación  
Figura 114 Distribución espacial de la temperatura  
Figura 115 Curva de potencia lenta en función de la presión de hidrógeno  
Figura 116 Evolución de la temperatura a lo largo de la pila  
Figura 117 Curva de potencia lenta en función de la presión de oxígeno  
Figura 118 Distribución de temperatura a lo largo de la pila

Tabla 1 Valores de los parámetros para la membrana  
Tabla 2 Valores de los parámetros para la capa catalítica  
Tabla 3 Valores de los parámetros para la difusora  
Tabla 4 Valores de los parámetros para la membrana  
Tabla 5 Valores de los parámetros para la capa catalítica  
Tabla 6 Valores de los parámetros para la difusora  
Tabla 7 Valores de los parámetros para el colector  
Tabla 8 Valores de los parámetros para la membrana  
Tabla 9 Valores de los parámetros para la capa catalítica  
Tabla 10 Valores de los parámetros para la difusora  
Tabla 11 Valores de los parámetros para el ánodo  
Tabla 12 Valores de los parámetros para los colectores

# 1

## Introducción

### 1.1. MODELICA en entorno DYMOLA

MODELICA es un lenguaje de programación de alto nivel especializado en la resolución de ecuaciones matemáticas, lo que lo hace adecuado para modelar el funcionamiento de sistemas dinámicos.

Es un lenguaje orientado a objetos, que consigue entre otras cosas:

- Simplificación del diseño del programa.
- Modularidad.
- Reutilización.
- Aumento en la productividad de los programadores.
- Permite la división de un problema complejo entre varios programadores distintos.
- Facilita el mantenimiento, la modificación y la depuración de los programas.

Este lenguaje especializado en ecuaciones matemáticas, las trata de un modo acausal, lo que hace muy sencillo la escritura del conjunto de las ecuaciones de un sistema. Para ello incluye algoritmos de manipulación simbólica, para la ordenación de las ecuaciones con vistas a la compilación. También incorpora un resolutor numérico de grupos de ecuaciones ODE y DAE.

Ya que los grupos de ecuaciones diferenciales algebraicas DAE pueden contener lazos algebraicos, este lenguaje incorpora mecanismos de ruptura de los lazos, también conocidos como *tearing*. Asimismo los grupos DAE que definen el sistema puede tener ligaduras algebraicas que reducen el número de grados de libertad del sistema compuesto, lo que no permite definir un número concreto y único de variables de estado; en ese caso el problema tiene un índice DAE mayor que uno, o igual a uno si tiene lazos algebraicos. El lenguaje MODELICA cuenta con mecanismos de manipulación simbólica que permiten la reducción del índice DAE hasta cero o uno. El índice de un grupo DAE no es intrínseco al sistema que describe, sino a la manera en que se expresan las ecuaciones. Refleja el hecho de que un sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas necesita una cierta cantidad de condiciones iniciales para su inicialización y posterior solución, además esas condiciones iniciales actúan sobre las variables de estado para su posterior evolución. El algoritmo de reducción del índice DAE tiene como objetivo final poder asignar la causalidad a todas las variables del modelo.

El lenguaje MODELICA se ejecuta en diversas plataformas, concretamente se emplea DYMOLA en este trabajo.

DYMOLA se creó en el 1994, y se trata del entorno de programación en lenguaje MODELICA. El objetivo es que modelando un sistema se generen un conjunto de ecuaciones, éstas conforman el modelo el cual junto con las condiciones iniciales conduce a la generación de resultados.

Para conectar los distintos modelos creados se dispone de dos modos de conectividad; en los modelos conectores se pueden incluir variables tipo longitudinales (*through*) o transversales (*across*), según si su valor se determina como suma cero o mediante igualdades en los nodos. En modelica las conexiones *through* se definen con la palabra reservada *flow* (flujo).

En pos de la ayuda al programador, el lenguaje tiene predefinidos una amplia cantidad de operadores.

MODELICA puede manejar eventos en tiempo continuo y discreto, que determinan la evolución de los sistemas modelados. También permite la inicialización detallada y configurable de esos modelos.

Otra característica es que puede incluir una sección anotación, en la cual se guardan las descripciones e instrucciones necesarias para el manejo y la depuración del modelo, que funciona como si de un manual de usuario se tratase.

Los modelos generados se alojan en librerías creadas con una estructura jerárquica y que pueden ser empleadas por otros programadores para generar otros modelos más complejos.

Por último, DYMOLA es capaz de interactuar con otros entornos como puede ser el caso de SIMULINK.

## 1.2. Células de combustible

En el desarrollo industrial, las necesidades energéticas han llevado a un enorme consumo de recursos naturales, en concreto de hidrocarburos. Éstos se presentan en cantidad limitada, de modo que se ha previsto su agotamiento en un horizonte cercano. Para evitar el colapso energético, es necesario encontrar nuevas fuentes de energía, y es aquí donde aparecen las células de combustible.

Las células o pilas de combustible se idearon a finales de los años 30 por Christian Friedrich Schönbein en Suiza. Aunque existen muchos tipos de pilas, en este trabajo se hace referencia exclusivamente a las de electrolito polimérico o PEM. Este tipo de pilas al funcionar consumen oxígeno e hidrógeno generando agua; entonces se desplaza la necesidad energética de los hidrocarburos al hidrógeno.

Los distintos modos de fabricar hidrógeno barato y ecológico, configuran un panorama social conocido como sociedad del hidrógeno. Alguna de las ventajas que plantea dicha sociedad son la descentralización de la producción de las fuentes de energía (hidrógeno) y la reducción de la emisión de gases con efecto invernadero.

Las pilas de hidrógeno son dispositivos multicapa que consumen hidrógeno y oxígeno en un entorno húmedo y generan electricidad y agua. Funcionan a una temperatura relativamente baja de unos 80°C que permite su rápida puesta en funcionamiento y degrada poco los materiales que la componen.

El acrónimo PEM significa polymer electrolyte membrane, haciendo referencia al material del que está compuesta su membrana. Las capas que componen una pila PEM son las siguientes:

### 1. Colector anódico

Elemento estructural que sirve para distribuir los gases de alimentación y como bastidor para la pila.

### 2. Capa difusora anódica

Es el medio a través del cual se transportan el hidrógeno y el agua (líquida y gaseosa) hacia el ánodo.

### 3. Capa catalítica anódica

En ella se produce la oxidación del hidrógeno molecular, convirtiéndose en protones cargados positivamente.

### 4. Membrana polimérica

Es el medio que permite la transmisión de los protones a su través, al mismo tiempo que impide en gran medida el paso del oxígeno. Necesita estar hidratada para su correcto funcionamiento.

### 5. Capa catalítica catódica

En ella se produce la reducción del oxígeno molecular, convirtiéndose en átomos de oxígeno con dos cargas negativas.

### 6. Capa difusora catódica

Es el medio a través del cual se transportan el oxígeno y el vapor de agua hacia el cátodo, al mismo tiempo que se evacúa el agua líquida generada por la reacción electroquímica.

### 7. Colector catódico

Elemento estructural que sirve para distribuir el oxígeno hidratado y drenar el agua líquida, también es el bastidor de la pila.

## 1.3. Objetivos y organización

El objetivo de este trabajo es la creación de una librería con modelos capaces de describir en profundidad una pila de hidrógeno con membrana polimérica, así como el análisis de dichos modelos en función de sus parámetros. Se pretende con todo eso, la comprensión del funcionamiento de las pilas de hidrógeno mediante el empleo de la herramienta del modelado. De resultas, se han obtenido una gran cantidad de gráficas y resultados que aportan una enorme cantidad de información y que ayudan a profundizar en el conocimiento interno y externo de las pilas.

Para esta labor este trabajo se ha dividido en varias partes, cada una de las cuales se encuentra en un capítulo distinto. Este estudio y sus modelos van evolucionando a lo largo de la obra en función de la cantidad de fenómenos implementados en los modelos, por lo tanto, a medida que se avanza en los capítulos los modelos describen más fenómenos y por lo tanto se vuelven más realistas.

En la primera y segunda sección de cada capítulo se describen los objetivos de modelado y la base matemática y física en la que se basa cada modelo.

En las siguientes secciones se lleva a cabo el análisis pormenorizado del modelo y se sacan las conclusiones oportunas.

En cuanto a los capítulos, responden a distintos niveles de implementación de fenomenología físico-química.

El capítulo segundo se corresponde con el modelado del cátodo, en el que tan sólo esta parte se modela haciendo la hipótesis de que la dinámica del ánodo es mucho más rápida y no va a existir carencia de protones. Es el modelo más simple, y siendo la base sobre el que se asientan los demás modelos, impone las bases y metodología de programación para el resto de capítulos. El objetivo es siempre crear un modelo rápido, preciso y eficaz.

El tercer capítulo se centra en el modelado térmico, así como la depuración del anterior modelo incorporando fenómenos no modelados y corrigiendo los defectos del modelo anterior. La descripción detallada de toda la fenomenología implicada se encuentra en las dos primeras secciones de este capítulo.

El cuarto capítulo completa el modelo con el modelado del ánodo. Es el modelo definitivo y el más completo. La complejidad ha aumentado y la velocidad de ejecución es un poco menor, pero las descripciones que aporta son muy completas.

# 2

## Análisis mediante modelado del cátodo

### 2.1. Introducción

Con este segundo capítulo comienza el trabajo de fin de máster; este trabajo se ha basado en parte en el trabajo de prácticas de instrumentación y control, dentro del máster en ingeniería de sistemas y control. No es necesario el conocimiento de dichos trabajos de prácticas para la comprensión de este trabajo de fin de máster.

La descripción detallada de la base matemática sobre la que se asienta el trabajo de prácticas, está descrita en profundidad en la memoria de dicho trabajo [1], siguiendo el guión de los profesores Miguel ángel Rubio y Alfonso Urquía [2].

Los objetivos planteados para este trabajo son entre otros: Obtener un buen rendimiento del modelo optimizando la velocidad del mismo. Depurar los fallos de código que pudiera haber. Generar una descripción matemática del modelo para que sea fiel a los principales fenómenos electroquímicos. Organizar el modelo tanto en su presentación, como en su modelado. Disminuir al máximo posible el número de descripciones basadas en eventos...

En este trabajo se cumplen los objetivos, obteniendo un modelo sólido y preciso sobre el que se basa cada capítulo. Cada uno de los capítulos siguientes tiene unos modelos en la librería que son específicos de cada capítulo.

A lo largo de este primer capítulo, se muestra el modelado matemático del cátodo de la célula de combustible, y los resultados del análisis mediante simulación de este tipo de célula galvánica. En los siguientes capítulos los modelos y las descripciones matemáticas serán cada vez más amplias.

### 2.2. Modelado matemático

#### 2.2.1. Estructura del modelo

Todos los elementos del modelo se encuentran en una librería compacta denominada "celula\_PEM". El código completo de la librería puede encontrarse en el [anexo A](#).

Dentro de ella se alojan las siguientes sublibrerías:

1. unidades\_ext: Contiene las definiciones de tipos que no se encuentran en la librería estándar de MODELICA.
2. piezas: Contiene los elementos finitos a partir de los que compondremos el modelo de la pila.
3. modelos\_compuestos: Son pruebas y ejemplos de cómo combinar las piezas para crear modelos de pila.
4. celula\_combustible\_PEM: Son modelos definitivos, y ensamblados según los requerimientos de este trabajo. A partir de estos modelos, se pueden realizar las simulaciones.
5. ejercicios: En ésta se encuentran los modelos de la anterior, pero con los parámetros adaptados a cada simulación concreta. Sirven para la comprensión de los modelos y parámetros, sirviendo como ejemplos de utilización.

El principio sobre el que se asienta el modelado de la pila, es el que se explica en el guion [2], y que consiste en dividir cada una de las capas de la pila en una cantidad determinada de volúmenes de control. Posteriormente, dichos volúmenes de control deberán ser conectados entre sí mediante modelos de transporte. Ejemplo:

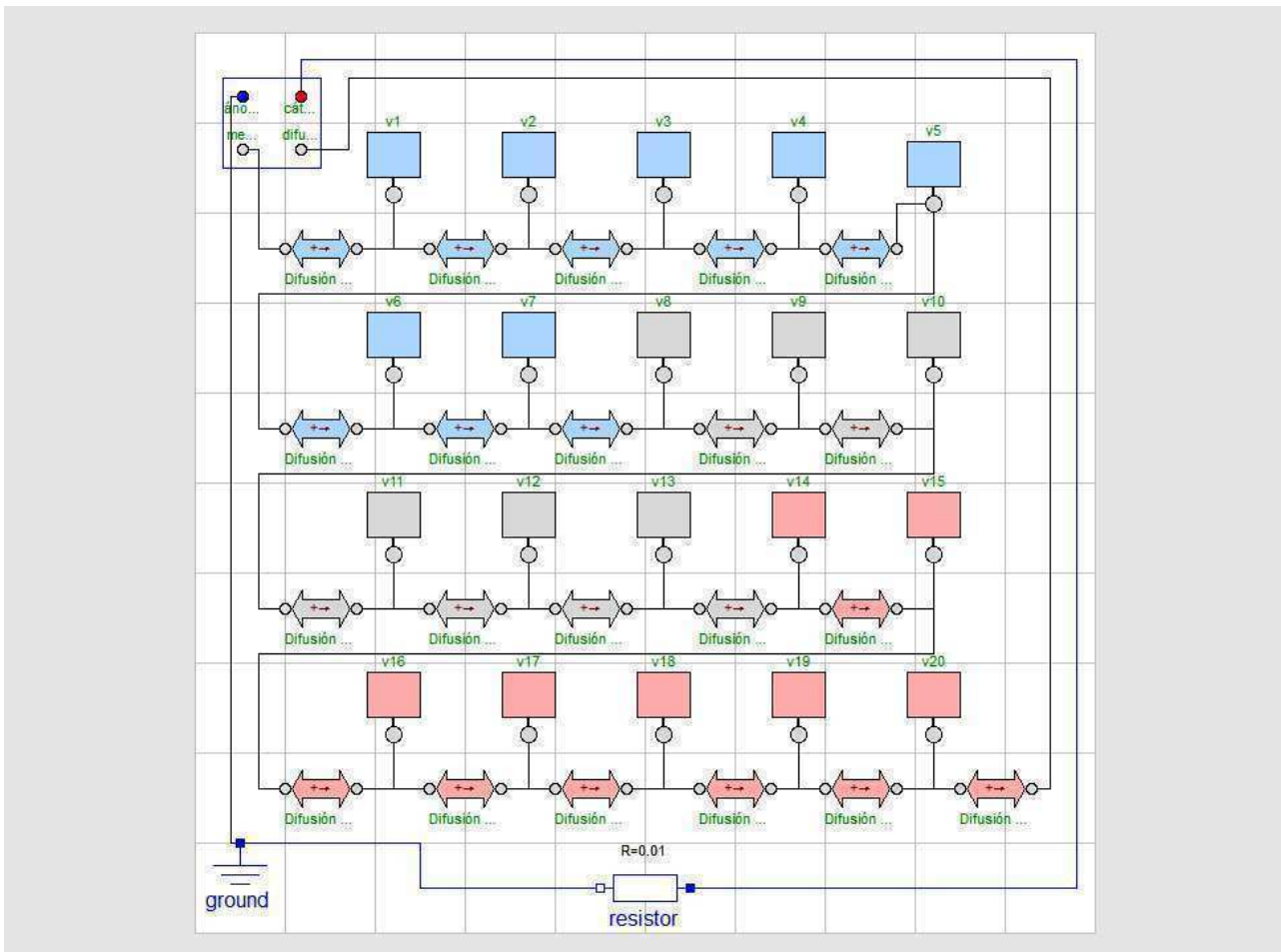


Figura 1 Ejemplo de conexión de los elementos finitos para crear un modelo de pila

Los volúmenes de control, deberán ser capaces de modelar la evolución de los gases considerados como ideales, de los líquidos, y también de las generaciones de corrientes eléctricas y gases consecuencias de las reacciones electroquímicas.

Asimismo los modelos de transporte deben ser fieles tanto a la conducción de corrientes eléctricas, como a la difusión de líquidos y gases a su través.

Ya por último, se puede conectar todo mediante el modelo "terminales", a alguno de los modelos de componentes eléctricos de nuestra librería, o bien a cualquiera de los componentes eléctricos de la librería estándar de MODELICA. En la librería existen unos pocos componentes especialmente diseñados para analizar las características de la pila.

En este primer capítulo se trabaja en el modelado del cátodo, para ello hay que considerar que la pila se compone en la aproximación de este capítulo, de tres capas fundamentales, a saber:

1. Membrana: Permite el movimiento protonico, siendo impermeable al paso del hidrógeno y el oxígeno gaseosos, en especial este último. También permite el paso de pequeñas cantidades de agua líquida o vapor, lo que contribuye al drenado del cátodo y al hidratado de la membrana.
2. Capa catalítica: Donde se producen las reacciones electroquímicas (catalizadas).
3. Capa difusora: Permite el paso del oxígeno gaseoso a la capa catalítica; a su vez drena el agua líquida y gaseosa generada en la reacción de la capa anterior. Por último transporta los electrones desde el circuito eléctrico exterior hacia la capa catalítica, para completar la reducción del oxígeno gaseoso.

La reacción de oxidación (del hidrógeno) se realiza en el ánodo, que en la aproximación de este capítulo no se modela. Siendo así, no se comete demasiado error, puesto que la dinámica de oxidación es considerablemente más rápida que la de reducción.

El cátodo tiene otro elemento más, denominado colector. Éste tampoco se modela en este trabajo, quedando como posible línea de trabajo futura.

A continuación se acomete la interpretación matemática de la pila de combustible, y se hace mención a las diferencias que en este trabajo pudiera haber con respecto al trabajo de prácticas del máster.

### 2.2.2. Difusión de dos gases y un líquido en un medio poroso

Para modelar la difusión de las especies, las ecuaciones se reparten entre los volúmenes de control y los fenómenos de transporte, estando fuertemente relacionadas entre sí.

En lo referente a los modelos de transporte nos basaremos en la ecuación de difusión, donde nos encontramos con que la corriente de gas (flujo molar por unidad de superficie) que cruza desde un pequeño volumen hacia el siguiente se describe por:

$$J = \frac{-\varepsilon}{\tau^2} \frac{D}{RT} \nabla p \quad (2.1)$$

Este tipo de descripciones del fenómeno de la difusión se pueden encontrar en [3], junto con posibles soluciones en función de las condiciones de contorno. Se trata de una ecuación en derivadas parciales de tipo parabólico. Lo más importante de señalar, es que para este tipo de ecuaciones se verifica el principio del valor máximo, según el cual los valores máximo y mínimo se encuentran o bien en el instante inicial o en los puntos de la frontera.

En cuanto a los coeficientes de difusión, al tratarse de dos difusiones simultáneas, ordinaria (binaria) y Knudsen, el coeficiente global que empleamos es el siguiente.

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_{\text{ord\_bin}}} + \frac{1}{D_K} \quad (2.2)$$

$$D_{\text{ord\_bin}} = D_{\text{ord\_bin}}^{\text{ref}} \frac{P_g}{P_g^{\text{ref}}} \left( \frac{T_g}{T_g^{\text{ref}}} \right)^{1.5} \quad (2.3)$$

Se aplican estas ecuaciones (discretizadas), a cada una de las especies gaseosas. Pero la difusión del agua líquida sigue los mismos principios, sólo que calculados a partir de las concentraciones.

$$J_{\text{liq}} = -D_{\text{liq}} \nabla C \quad (2.4)$$

Pasando ahora a los volúmenes de control, en ellos se modelan las ecuaciones de estado de la mezcla gaseosa, considerada como compuesta por gases ideales.

$$P_g = P_{O_2} + P_{H_2O-g} \quad (2.5)$$

$$P_i V_i = n_i R T \quad (\text{aplícase a cada uno de los gases}) \quad (2.6)$$

También las ecuaciones de balance de las especies en función de su flujo y generación (o generaciones diversas).

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = F_i + G_i \quad (\text{aplícase a cada una de las especies}) \quad (2.7)$$

Y las ecuaciones que describen la transición de estados en el agua.

$$G_{H_2O-l} = V_g \frac{\alpha_v \beta}{RT} (P_{H_2O-g} - P_{H_2O}^{\text{sat}}) \quad (2.8)$$

$$P_{H_2O}^{\text{sat}} = P_0^{\text{sat}} e^{\left[ \left( \frac{1}{T_0^{\text{sat}}} - \frac{1}{T_g} \right) \frac{L_v}{R} \right]} \quad (2.9)$$

$$L_v = 3.1192 \cdot 10^4 + 1.854018 \cdot 10^2 T - 8.05959 \cdot 10^{-1} T^2 + 1.379322 \cdot 10^{-3} T^3 - 9.9104399 \cdot 10^{-7} T^4 \quad (2.10)$$

Todas esas ecuaciones se han trasladado al modelo convenientemente discretizadas y reordenadas para que se correspondan con la causalidad del modelo, y de ese modo restarle esfuerzos al compilador de DYMOLA. Eso redundará en una mejora en el rendimiento del modelo.

### 2.2.3. Conducción eléctrica y reacción electroquímica

Este apartado presenta discrepancias y novedades con respecto al propuesto en [1] y [2]. A continuación se enumeran las hipótesis de modelado.

Para comenzar, el modelo se divide (eléctricamente hablando) en dos partes, unidas entre sí por un modelo de frontera denominado "terminales".

La parte exterior, se corresponde con el circuito eléctrico externo conectado a la pila.

La parte interior, se corresponde con la circulación eléctrica a través de la pila.

Existe un lazo entre ambas partes del siguiente modo.

1. La pila genera una tensión en función de sus condiciones iniciales.
2. A través del modelo "terminales", dicha tensión se traslada al circuito eléctrico externo conectado a la pila.
3. Conociendo dicha tensión, se deduce la corriente que atraviesa el circuito exterior.
4. Esta última corriente, se manda a través del modelo "terminales" a la pila.
5. Se generan unas nuevas condiciones, retornando al paso 1.

Este lazo se repite al comienzo de la simulación, hasta que se produce la convergencia. A partir de ese momento las variables se van modificando o integrando de forma continua, o bien hasta que se produzca discontinuidad por algún evento. Si esto ocurre se repite el ciclo hasta que haya una nueva convergencia.

El lazo arriba indicado, converge cuando el modelo está bien planteado.

Los componentes eléctricos exteriores, están inspirados en la librería estándar de MODELICA, pudiéndose usar dichos elementos.

La evolución de las corrientes y tensiones interiores se describen a continuación con más detalle.

- En cuanto a las corrientes:
  - La corriente total que atraviesa la pila denominada  $I_{\text{linea}}$ , debe ser igual a la corriente del circuito externo.
  - La corriente  $I_{\text{linea}}$ , debe ser igual a la suma de las corrientes protónica y electrónica, considerando los signos de las corrientes para que fluyan en la misma dirección.
  - La corriente electrónica se genera en su totalidad en la capa catalítica.
  - En la membrana sólo hay corriente protónica.
  - En la capa catalítica coexisten ambos tipos de corrientes.
  - En la capa difusora sólo hay corriente electrónica.
  - La generación eléctrica se distribuye uniformemente a lo largo de toda la capa catalítica.
  - La generación electrónica y protónica son iguales, cada electrón se recombina con un protón.
  - La pila no se conecta eléctricamente (en el modelo "terminales") al circuito externo hasta que no pasa un tiempo de estabilización (bastan unos pocos segundos), permitiendo a los gases de la pila tomar sus valores estacionarios y también facilitando al compilador la convergencia en el instante inicial.
- En cuanto a las tensiones:
  - La tensión de la pila, evoluciona a lo largo de la pila (fuerza electromotriz).
  - La tensión de salida denominada  $V_{\text{cc}}$ , es la suma de la tensión termodinámica de la reacción electroquímica  $E_0$ , más los sobrepotenciales de activación, de concentración, de conducción electrónica y de conducción protónica.
  - Esos sobrepotenciales son la mayoría del tiempo negativos, contribuyendo a la merma del potencial de salida.
  - La tensión termodinámica se considera constante; en el siguiente capítulo se tratará de su evolución con la temperatura.

La forma en la que el potencial de la pila evoluciona a lo largo de ésta, se puede ver en las gráficas siguientes, las cuales han sido obtenidas con un consumo de 500(A). Las corrientes son muy elevadas debido a que la pila tiene un metro cuadrado de sección, sin embargo la densidad de corriente es pequeña, siendo este caso de  $50 \left( \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right)$ , cuando en la actualidad es fácil encontrar pilas con densidades entre  $200 \left( \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right)$  y  $500 \left( \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right)$ . En el sistema internacional son  $2000-5000 \left( \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$ , pero en la mayoría de los manuales se representa la densidad de generación en miliamperios por centímetro cuadrado.

El texto sobre la gráfica es el comando MATHEMATICA con el que se genera cada gráfica, contiene información sobre los valores de cada gráfica.

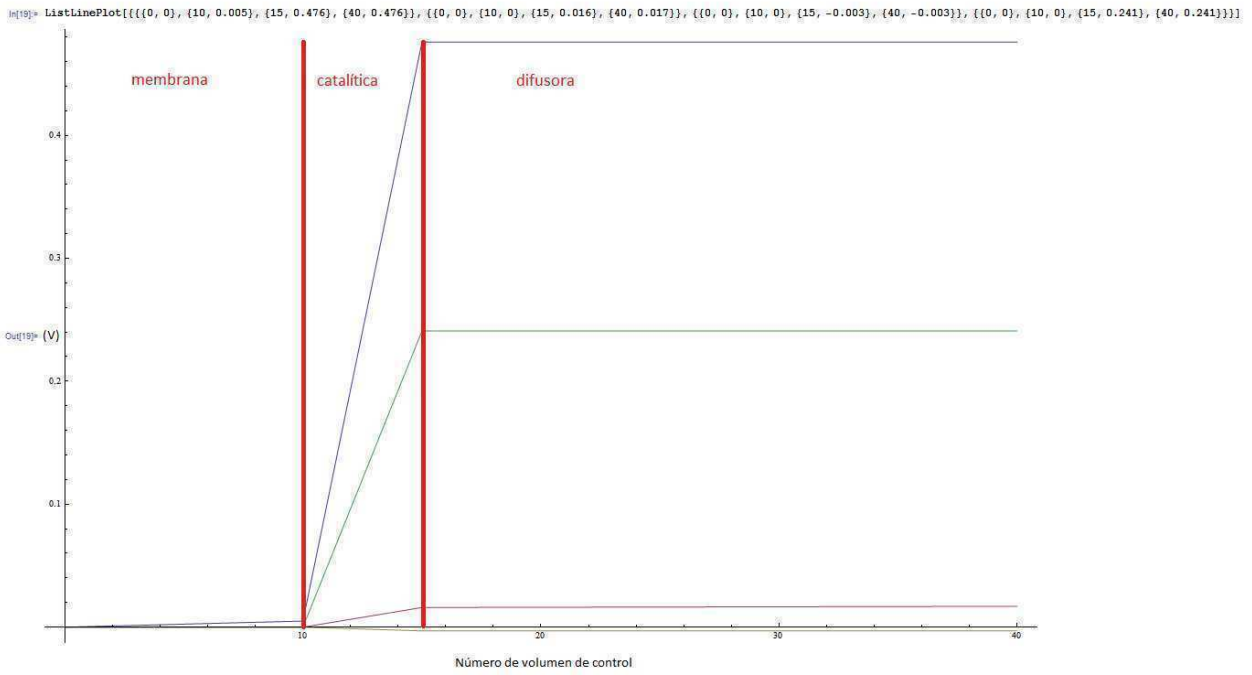


Figura 2 Valor de los sobrepotenciales a lo largo de la pila (las abscisas representan el número de volumen de control en el modelo)

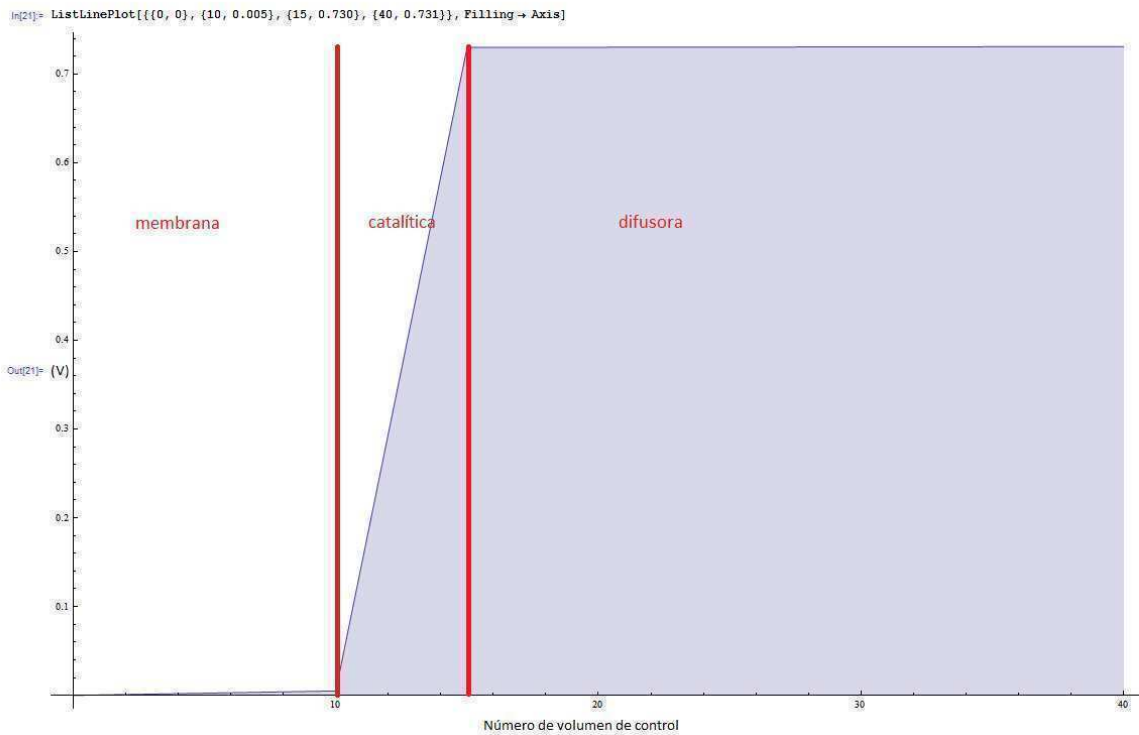


Figura 3 Valor del sobrepotencial total, suma de todos los sobrepotenciales tenidos en cuenta en el modelo.

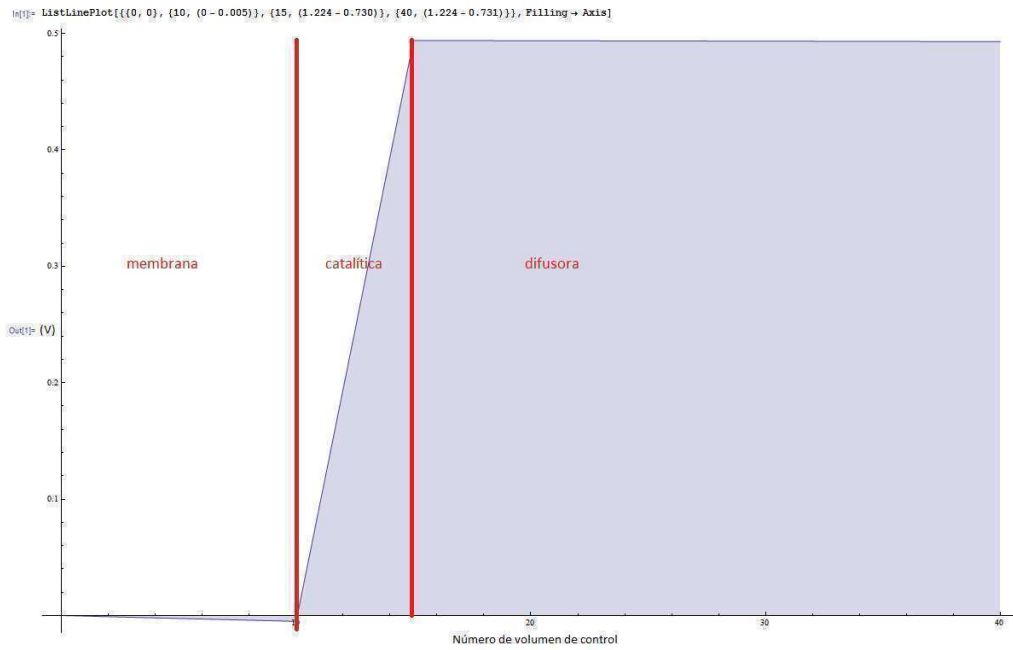


Figura 4 Potencial eléctrico (fuerza electromotriz) a lo largo de la pila, representada en las abscisas con su número de volumen de control

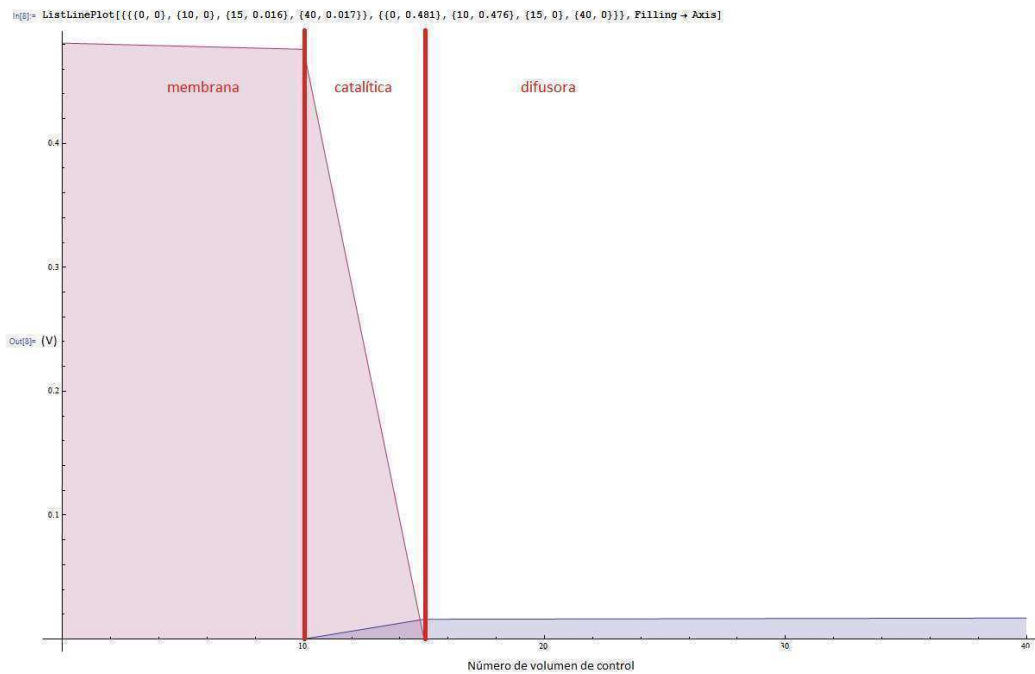


Figura 5 Potenciales electrónico (violeta) y protónico (morado) cuyo gradiente genera las corrientes electrónica y protónica

La forma de las curvas es aproximada. Ésta no es completamente recta en la zona catalítica, puesto que los sobrepotenciales de concentración y activación podrían no serlo (rectos). La finalidad de las gráficas suprascritas es más explicativa que descriptiva.

Las ecuaciones que describen los fenómenos electroquímicos son:

- En cuanto a los campos electrónico y protónico, que mueven las partículas cargadas por la pila (Figura 5):

$$J_p = -K_p \varepsilon_e \frac{\partial V_p}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$J_e = -\sigma_e \varepsilon_s \frac{\partial V_e}{\partial x} \quad (2.12)$$

- La generación electrónica (en cuanto al cálculo fem y las corrientes generadas por la pila en cada volumen de control) se distribuye uniformemente por toda la capa catalítica.

$$G_e = \frac{-I_{\text{linea}}}{\text{NUM}_{\text{vc}}} \quad (2.13)$$

$I_{\text{linea}}$  Considerada positiva. Las generaciones con signo negativo significan que salen del volumen de control.

$$G_e = G_p \quad (2.14)$$

$$G_{\text{reac}, O_2} = \frac{G_e}{4F} \text{ (Negativa, se consume oxígeno)} \quad (2.15)$$

$$G_{\text{reac}, H_2 O, g} = \frac{-G_e}{2F} \text{ (Positiva, se genera vapor de agua)} \quad (2.16)$$

$$I_{\text{linea}} = I_p + I_e \quad (2.17)$$

- La fuerza electromotriz es la suma del potencial termodinámico de la reacción, más los sobrepotenciales (en general negativos).

$$V_{\text{cc}} = E_0 + E_e + E_p + E_{\text{act}} + E_{O_2} \quad (2.18)$$

Los sobrepotenciales  $E_e$  y  $E_p \neq f(x)$  no se deben confundir con los potenciales  $V_e$  y  $V_p = f(x)$ . Aunque se cumple que  $E_e = V_e$  (fin difusora) y  $E_p = V_p$  (comienzo membrana), véase la [figura 5](#). Tampoco se deben confundir  $V_e$  y  $V_p$  con las variables homónimas del modelo de pila. En ese caso, dichas variables se utilizan para calcular el sobrepotencial final ( $E_e$  ó  $E_p$ ) integrando a lo largo de la pila.

Sobrepotenciales ohmicos:

$E_e$  y  $E_p$  se calculan en cada modelo de transporte, a partir de las fórmulas (1.11) y (1.12) discretizadas.

Sobrepotencial de activación:

$$E_{\text{act}} = B \text{Log} \left[ 1 + \left( \frac{I_{\text{linea}}}{A_{\text{act}} I_{0 \text{ref}}} \right) \right] \text{ (ecuación de Tafel desarrollada; ver anexo B)} \quad (2.19)$$

Sobrepotencial de concentración:

$$E_{O_2} = \left( C_1 e^{\left( \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} - P_{\text{inf}}} \right) - C_2} \right) / A \text{ (ecuación inspirada en [4] pero ajustada a las características de esta pila; ver anexo B)} \quad (2.20)$$

$$P_{xO_2} = (1 - \chi_{\text{rel}}) P_{O_2} \quad (2.21)$$

En el modelo de la pila, los sobrepotenciales de activación y concentración se dividen entre los volúmenes de control del área catalítica, para promediar las fluctuaciones de sus valores a lo largo de dicha capa.

Es muy importante reseñar que en este modelo, la influencia de la concentración (presión) de oxígeno en el potencial electromotriz se manifiesta mediante su propio sobrepotencial, a diferencia del modelo empleado en los textos [1] y [2], que incluía esos efectos en la ecuación de Tafel; véase la ecuación (4.12) de [2]. Véase además que los efectos del encharcamiento se tienen en cuenta dentro de este mismo sobrepotencial, teniendo en cuenta que la presión efectiva del oxígeno se ve mermada por la carga de agua. Para esto se puede considerar que la fracción de poro ocupada por agua, es una fracción de catalizador que no puede estar en contacto con el gas oxígeno, resultando entonces en una presión efectiva (útil) de oxígeno menor que la presión real de oxígeno. De ese modo el encharcamiento se manifiesta mediante este sobrepotencial, en el cómputo de la tensión de salida.

## 2.2.4. Ensamblado del modelo y valores de los parámetros

En la [figura 1](#) se muestra un ejemplo gráfico de la forma correcta de conectar los componentes de la librería entre sí, para modelar una pila.

Con respecto al modelo de los textos [1] y [2], se puede apreciar que se ha simplificado mucho la forma de componer la pila, de modo que ahora al ser tan similares y compatibles entre sí, los elementos de cada capa no necesitan interfaces con las otras capas.

El único modelo de tipo interface que queda, es el denominado "terminales", el cual sirve como conexión entre el modelado electroquímico del interior de la pila y el modelado electrónico de la circuitería externa.

A la hora de la composición del modelo, sin duda algunos parámetros necesitan sus valores. La mayoría de dichos valores están escritos por defecto en la librería, pero algunos como por ejemplo el primer y último elementos de transporte, tienen que cambiar el valor de su parámetro "NUMvc" al doble, para simular que tienen la mitad de longitud.

A continuación se listan los valores de los parámetros empleados en la simulación por defecto de la pila, tomados de [2].

<b>Membrana</b>		
Temperatura del gas	$T_g$	340 (°K)
Ancho de la capa		$8 \cdot 10^{-5}$ (m)
Tortuosidad	$\tau$	1
Sección del medio	$S_{vc}$	1 (m <sup>2</sup> )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3} \left( \frac{Kg}{mol} \right)$
Densidad del agua	$\rho_{H_2O,l}$	$972 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$
Densidad de la membrana	$\rho_e$	$2000 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$
Constante de los gases ideales	R	$8.31447 \left( \frac{J}{\text{°K mol}} \right)$
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ (m <sup>2</sup> )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3} \left( \frac{m}{s} \right)$
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O,l}$	$5.5 \cdot 10^{-6} \left( \frac{m^2}{s} \right)$
Coefficiente de difusión del vapor de agua	$D_{H_2O,gK}$	$10^{-6} \left( \frac{m^2}{s} \right)$
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.72
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{0H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Referencia de temperatura de la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	0
Conductividad protónica del electrolito	$K_p$	$10 \left( \frac{s}{m} \right)$

Tabla 1 Valores de los parámetros para la membrana

<b>Catalítica</b>		
Temperatura del gas	$T_g$	340 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Ancho de la capa		$4 \cdot 10^{-5}$ (m)
Tortuosidad	$\tau$	5
Sección del medio	$S_{vc}$	1 ( $\text{m}^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{\text{H}_2\text{O}}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{mol}}$ )
Densidad del agua	$\rho_{\text{H}_2\text{O},1}$	$972$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )
Densidad de la catalítica	$\rho_e$	$4000$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )
Constante de los gases ideales	R	$8.31447$ ( $\frac{\text{J}}{^{\circ}\text{K mol}}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ ( $\text{m}^2$ )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )
Coefficiente de difusión binaria	$D_{\text{O}_2-\text{H}_2\text{O},g}^{\text{ref}}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Referencia de presión para la difusión binaria (ordinaria)	$P_g^{\text{ref}}$	$10^5$ (Pa)
Referencia de temperatura para la difusión binaria (ordinaria)	$T_g^{\text{ref}}$	308.1 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{\text{H}_2\text{O},1}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen)	$D_{\text{O}_2,K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{\text{H}_2\text{O},gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.2
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{\text{poros}}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{\text{sat}}$	$P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$	3169 (Pa)
Referencia de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{\text{sat}}$	298.16 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Densidad de generación electrónica del cátodo	$A_{\text{act}} I_0^{\text{ref}}$	$1.2$ ( $\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ )
Pendiente de Tafel	B	0.04 (V)
Referencia de presión del oxígeno en el cátodo	$P_{\text{O}_2}^0$	$10^5$ (Pa)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	1 ( $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ )
Conductividad protónica del electrolito	$K_p$	$0.1$ ( $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ )

Tabla 2 Valores de los parámetros para la capa catalítica

<b>Difusora</b>		
Temperatura del gas	$T_g$	340 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Ancho de la capa		$1.6 \cdot 10^{-3}$ (m)
Tortuosidad	$\tau$	1
Sección del medio	$S_{vc}$	1 ( $\text{m}^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{\text{H}_2\text{O}}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{mol}}$ )
Densidad del agua	$\rho_{\text{H}_2\text{O},1}$	$972$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )
Densidad de la catalítica	$\rho_e$	$4000$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )
Constante de los gases ideales	$R$	$8.31447$ ( $\frac{\text{J}}{^{\circ}\text{K mol}}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ ( $\text{m}^2$ )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )
Coefficiente de difusión binaria	$D_{\text{O}_2-\text{H}_2\text{O},g}^{\text{ref}}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Referencia de presión para la difusión binaria (ordinaria)	$P_g^{\text{ref}}$	$10^5$ (Pa)
Referencia de temperatura para la difusión binaria (ordinaria)	$T_g^{\text{ref}}$	308.1 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{\text{H}_2\text{O},1}$	$3.5 \cdot 10^{-11}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen)	$D_{\text{O}_2,K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{\text{H}_2\text{O},gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{\text{poros}}$	0.6
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.4
Presión de saturación del agua a $T_0^{\text{sat}}$	$P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$	3169 (Pa)
Referencia de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{\text{sat}}$	298.16 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$10^4$ ( $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ )
Conductividad protónica del electrolito	$K_p$	0 ( $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ )

Tabla 3 Valores de los parámetros para la difusora

En la subsección 1.3.4. Se muestran los resultados de simular otra pila con unos coeficientes de difusión bastante menores. Sirve para poder apreciar en su totalidad los tres fenómenos que contribuyen negativamente a la fuerza electromotriz de la pila, a saber: Sobrepotencial de activación, sobrepotenciales ohmicos y sobrepotencial de concentración.

## 2.3. Análisis del modelo

### 2.3.1. La curva de polarización en función de diversos parámetros

#### 2.3.1.1. Variación en función de la anchura de capa

A continuación se analiza la influencia de la longitud de las capas en la curva de polarización. Para ello se varía en la misma proporción las tres capas simultáneamente, no realizándose en este trabajo el análisis de la variación de anchura capa por capa. El objetivo es mostrar cómo influyen factores de fabricación (como el ancho de las capas) en las características macroscópicas de salida de la pila y por tanto en su rendimiento.

Dentro de la librería "Celula\_PEM", se halla la sublibrería "ejercicios". En ella se encuentran los casos concretos de aplicación de la pila a cada análisis particular. Concretamente para esta subsección, se utiliza el modelo "polarización\_variable\_longitudes", dentro del cual está definido el parámetro de longitud para cada una de las capas. Eso facilita la definición de todos los parámetros necesarios pero de una sola vez.

Al ejecutar el modelo arriba mencionado con los valores de longitud originales, con el doble de longitud y con la mitad de longitud en las tres capas, la forma de las curvas de polarización se pueden ver en esta gráfica.

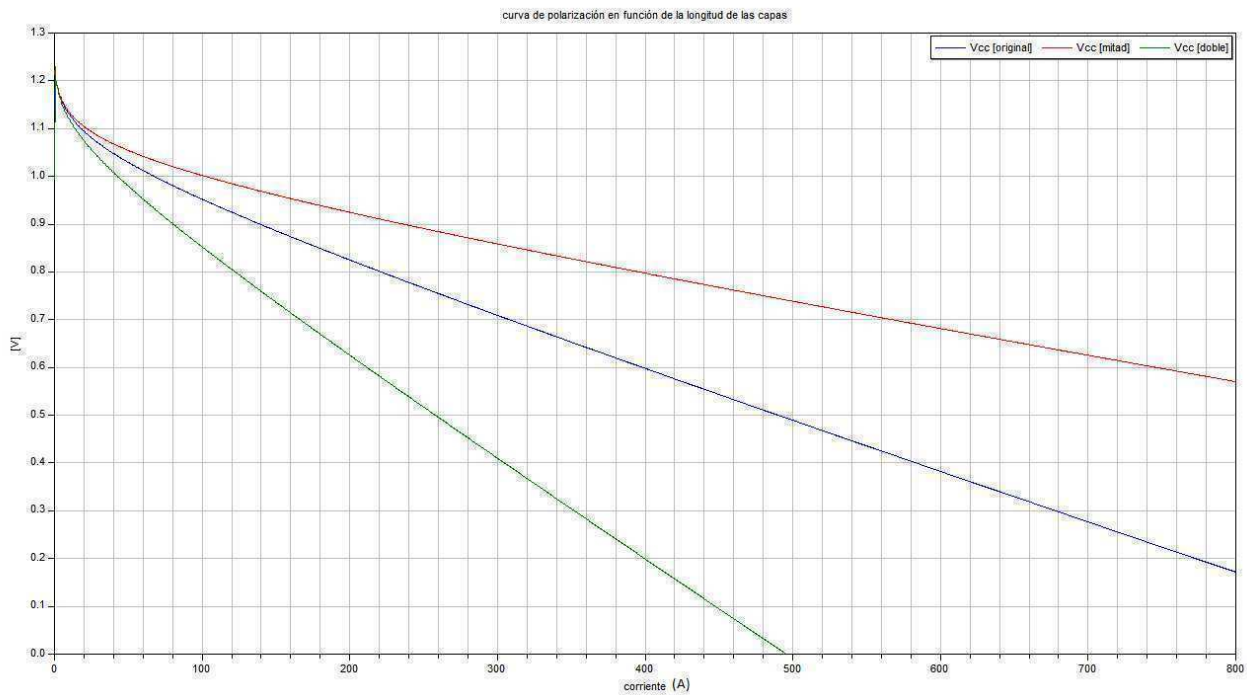


Figura 6 Curva de polarización en función de la longitud de las capas; las longitudes originales (ancho de las capas) están en las [tablas 1 - 3](#)

En toda gráfica de polarización de una pila PEM se pueden encontrar tres regiones:

- Una primera cercana al origen de abscisas, donde predominan los efectos del sobrepotencial de activación.
- Una segunda en el tramo central, donde predominan los efectos ohmicos.
- Una tercera en el tramo final, donde dependiendo de las características físicas y operativas de la pila, nos podemos encontrar un predominio de los efectos de concentración.

Dado el caso analizado, se comprueba que los efectos de este último tramo en la pila analizada, son muy pequeños y no se van a ver reflejados en la respuesta de la pila. Más adelante, en la subsección 1.3.4. se trabaja en otro caso en el que se pueden apreciar las tres zonas mencionadas.

En lo referente a los resultados, el efecto de aumentar la longitud de las capas es disminuir el rango dinámico de la pila. El responsable principal de la disminución del potencial es el sobrepotencial ohmico.

En la curva se aprecian las dos primeras regiones, cerca del origen la influencia del sobrepotencial de activación es predominante, pero luego pasa a tener más importancia el sobrepotencial ohmico protónico. Además, casi todo el sobrepotencial se genera en el cátodo, debido a la baja conductividad protónica de éste:  $K_p = 0.1 \left( \frac{S}{m} \right)$

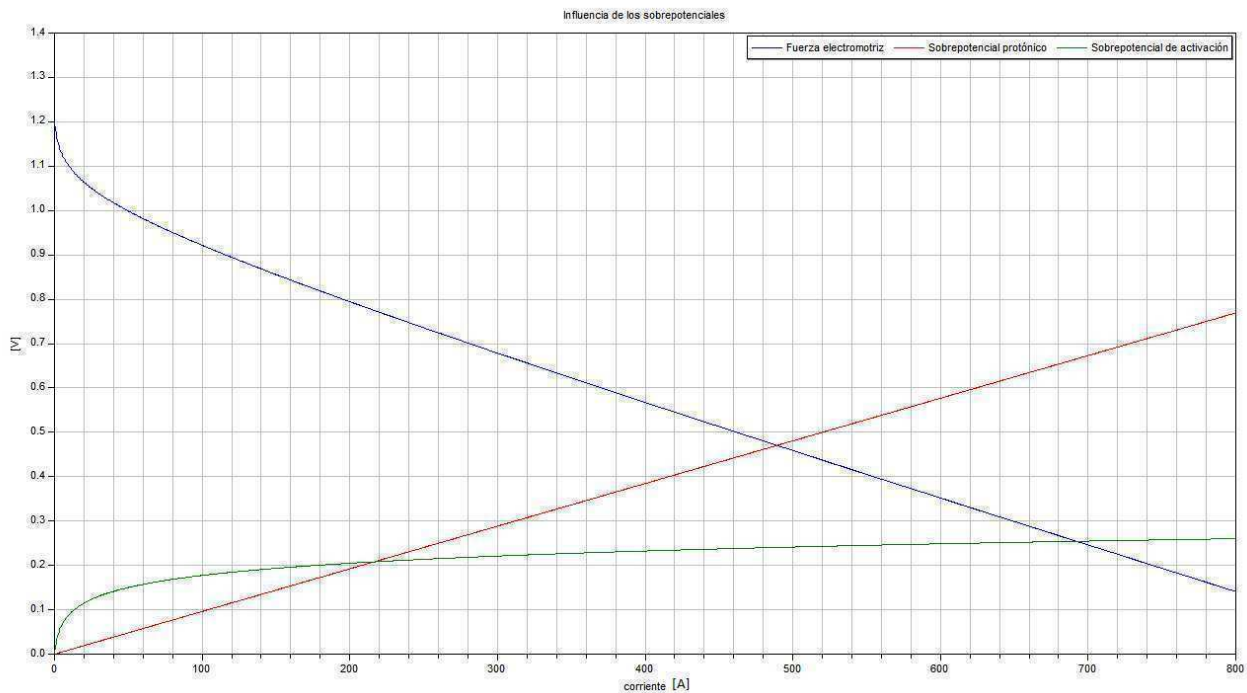


Figura 7 Valor que toman los sobrepotenciales en función de la corriente que circula por la pila.

La primera región llega hasta los 200(A), mientras que la segunda abarca el resto, y la tercera no existe. Se puede ver el sobrepotencial protónico generado casi en su totalidad en el cátodo.

La causa principal de la variación de la curva de polarización, el sobrepotencial protónico, se manifiesta sobre todo en la segunda región. Véase que el origen de las curvas es el mismo.

En conclusión, la influencia de este parámetro en la curva de polarización es muy grande, siendo más adecuadas desde este punto de vista las pilas con longitudes de capa pequeñas; especialmente en lo que se refiere a la longitud del cátodo. Éste debería ser lo más corto posible para aumentar el rango dinámico de la pila.

Una aclaración con respecto a las conclusiones. En las siguientes subsecciones, podría darse el caso de que en las conclusiones se llegue a resultados opuestos a éste. Eso tan sólo quiere decir que en las conclusiones, la pila es analizada con respecto a un sólo factor, debiéndose en el diseño hacer un compendio de intereses posiblemente contradictorios, para lograr el mejor resultado global.

### 2.3.1.2. Variación en función de la densidad de generación eléctrica

El siguiente aspecto a analizar, es el parámetro  $A_{act} I_0^{ref}$ . El área activa catódica - referencia de corriente de intercambio, o llamándolo de forma más abreviada, densidad de generación eléctrica del cátodo.

La ecuación de Tafel se deduce a partir de la ecuación de Butler-Volmer, siendo la pendiente de Tafel "B" una de las variables de la ecuación mencionada. La forma simplificada de la Butler-Volmer está descrita en el [anexo B](#) y tiene la siguiente forma.

$$G_e = -A_{act} I_0^{ref} \left( e^{\left( \frac{E_{act}}{B} \right)} - 1 \right) \quad (2.22)$$

(2.22) es la forma simplificada de la ecuación de Butler-Volmer para comportamiento puramente catódico y con las constantes del exponente englobadas en una única, conocida como pendiente de Tafel. En realidad la ecuación de Tafel:  $E_{act} = a + B \text{Log}[I_{linea}]$  es una aproximación de (2.22) para valores "elevados" de sobrepotencial, mientras que (2.22) es aplicable a todo el rango de sobrepotenciales.

Esta última es la ecuación que contiene este modelo, pero escrita de forma similar a como se escribe la ecuación de Tafel, y con el sobrepotencial despejado, para que el compilador de DYMOLA tenga menos problemas a la hora de trabajar. La finalidad última es obtener un modelo lo más rápido posible. Además se divide en el modelo entre el número de volúmenes de control, para de ese modo repartir el efecto de la contribución al sobrepotencial de activación entre todos los volúmenes de control.

A continuación se muestra cómo varía la curva de polarización al variar la densidad de generación eléctrica a partir del valor de la [tabla 2](#).

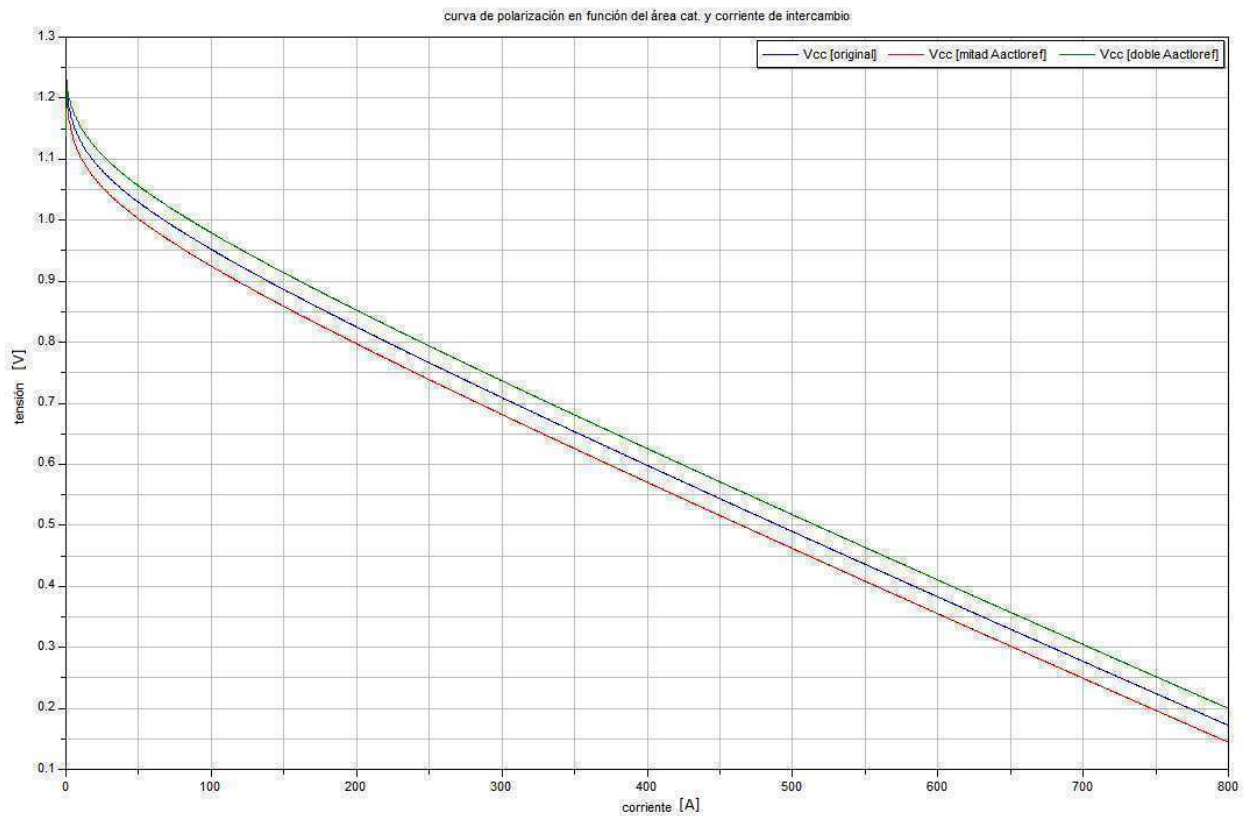


Figura 8 Curva de polarización en función de la densidad de generación eléctrica

Como es natural, el efecto de este parámetro se manifiesta en la primera región. Eso es debido a que es la zona en la que la influencia del sobrepotencial de activación es mayor.

Al despejar (2.22), la forma que toma el sobrepotencial explica las variaciones en la curva de polarización.

$$E_{\text{act}} = B \text{Log} \left[ 1 - \frac{G_e}{A_{\text{act}} J_0^{\text{ref}}} \right] \quad (2.23)$$

Por lo tanto, aumentar la densidad de generación significa disminuir el sobrepotencial, y así se obtiene una mayor fuerza electromotriz en la pila. Por deducción, el aumento de la fuerza electromotriz se aprecia tan sólo en la primera región de la curva, y entonces la región óhmica conserva su forma.

La curvatura al comienzo de la respuesta de polarización es efecto de la activación, y aumentar la densidad de generación disminuye la curvatura según (2.23), y viceversa.

Sirva como aclaración que en el modelo, la generación eléctrica tiene signo negativo, con lo que la ecuación del modelo tiene el signo de (2.23) positivo.

La conclusión es que en lo referente a este parámetro, se ha podido comprobar que su influencia es moderada o pequeña, y que interesa tener un valor de densidad de generación lo mayor posible. Sin embargo el rango dinámico será similar, obteniendo no obstante una mayor intensidad y por lo tanto una mayor potencia entregada por la pila, cuando aumenta la densidad de generación.

### 2.3.1.3. Variación en función de la pendiente de Tafel

Se parte de la forma que toma la ecuación (2.23). Algunas de las conclusiones que han sido obtenidas en la subsección anterior son aplicables en esta.

Como igual conclusión, la primera región es el lugar en el que se manifiesta este parámetro por medio del sobrepotencial de activación.

Por el contrario, la influencia de este parámetro tiene efecto opuesto a la densidad de generación eléctrica del cátodo. Toda vez que se aumenta la pendiente de Tafel, aumenta entonces el sobrepotencial, y con ello se ve mermada la fuerza electromotriz de la pila. Puede apreciarse en los siguientes resultados, donde se obtiene la curva de polarización al variar la pendiente de Tafel a partir del valor de la tabla 2.

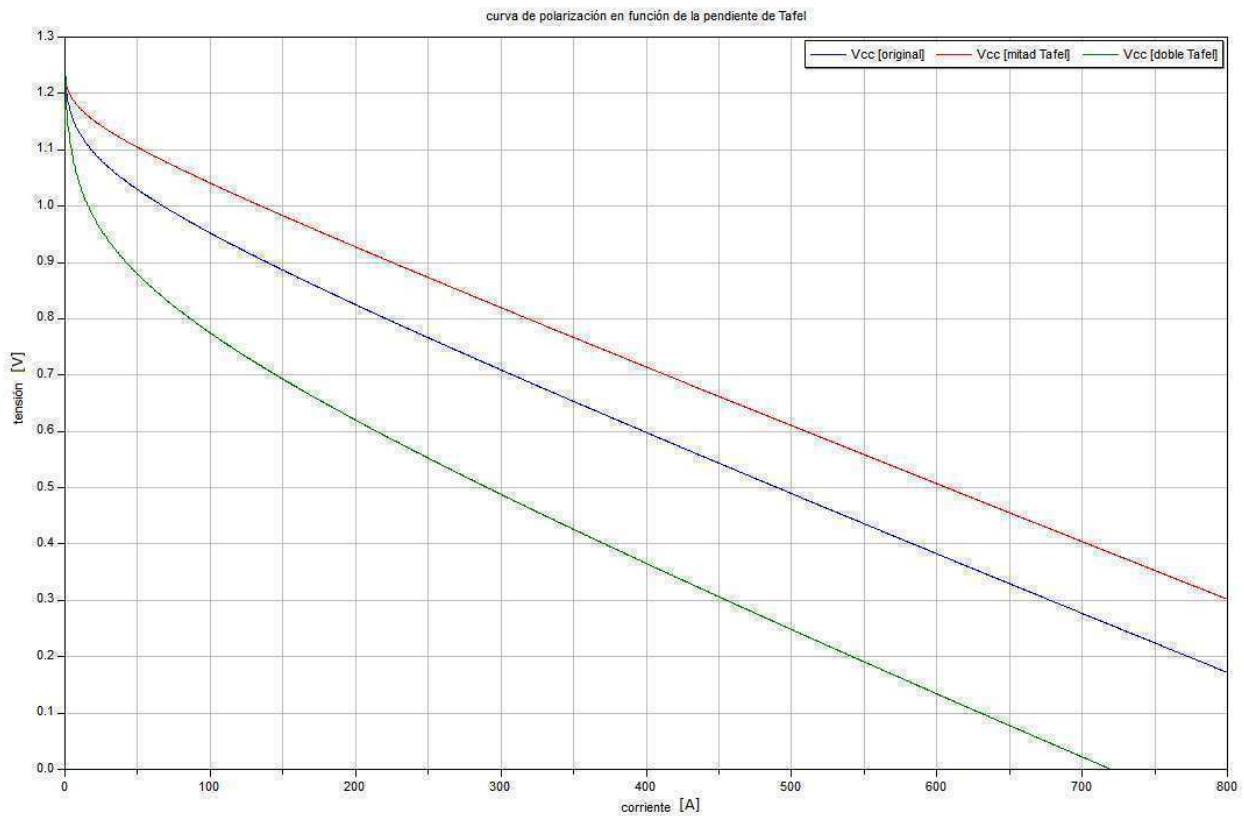


Figura 9 Curva de polarización en función de la pendiente de Tafel

En este supuesto, el efecto de variar la pendiente es bastante mayor que el de variar la densidad de generación. Nuevamente se aprecia la forma que toma la curvatura de la polarización cerca del origen, siendo más acusada al aumentar la pendiente de Tafel. En lo referente a la región óhmica, su forma no se verá afectada por este parámetro.

Los valores que la pendiente de Tafel suele tomar, rondan entre los 20 y los 100 milivoltios, por lo tanto este modelo ya maneja un valor bajo de dicha pendiente. Concluyendo, cabe decir que lo más conveniente es un valor lo más bajo posible de la pendiente de Tafel para conseguir una mayor tensión y potencia de pila. La influencia de este parámetro se puede considerar elevada, y el rango dinámico se puede ver bastante afectado por esta pendiente.

#### 2.3.1.4. Variación en función de la conductividad electrónica

En esta subsección se analiza cómo influye la conductividad electrónica de las capas en la curva de polarización. Cabe esperar que la zona de influencia de este parámetro sea la segunda región. Los resultados de este análisis (y siguientes) se pueden emplear para la mejor elección de los materiales y su formato en la pila, y para decidir qué se puede variar y en qué repercutirá.

El sobrepotencial óhmico es una consecuencia de la ecuación (2.12), la cual en su forma discretizada toma la siguiente forma.

$$E_e = I_e \frac{L_{vc}}{S_{vc} \sigma_e \epsilon_s} \quad (2.24)$$

Se hace ahora evidente que la consecuencia de un aumento de la conductividad será una disminución del sobrepotencial óhmico electrónico, y con ello un aumento en la fuerza electromotriz de la pila.

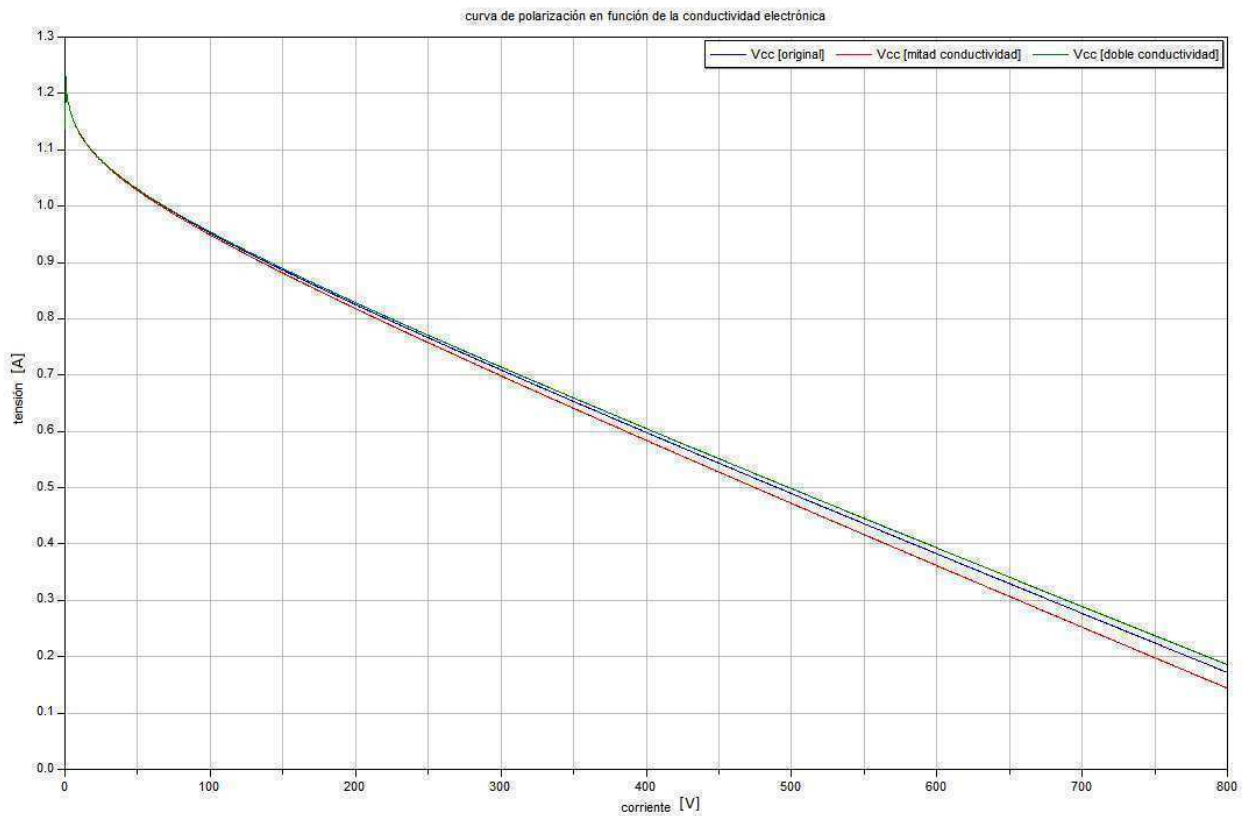


Figura 10 Curva de polarización en función de la conductividad electrónica de las capas, reseñadas en las tablas 1 - 3

La zona de influencia de este parámetro es la segunda región, como se preveía.

La conclusión es que los materiales de la pila son normalmente tan buenos conductores electrónicos que en general la influencia de este parámetro es pequeña. Es importante que la conductividad electrónica sea lo mayor posible, para aumentar la corriente y con ello la potencia entregada. Por otro lado el rango dinámico apenas se verá afectado.

#### 2.3.1.5. Variación en función de la conductividad protónica

En este análisis es la ecuación (2.11) la responsable de las variaciones en la curva de polarización. La forma discretizada de dicha ecuación es la siguiente.

$$E_p = I_e \frac{L_{vc}}{S_{vc} K_p \epsilon_e} \quad (2.25)$$

Esta ecuación está presente en los modelos de transporte.

Los efectos de la variación mencionada en esta subsección son análogos a los de variar la conductividad electrónica, pero se manifiestan con mayor intensidad.

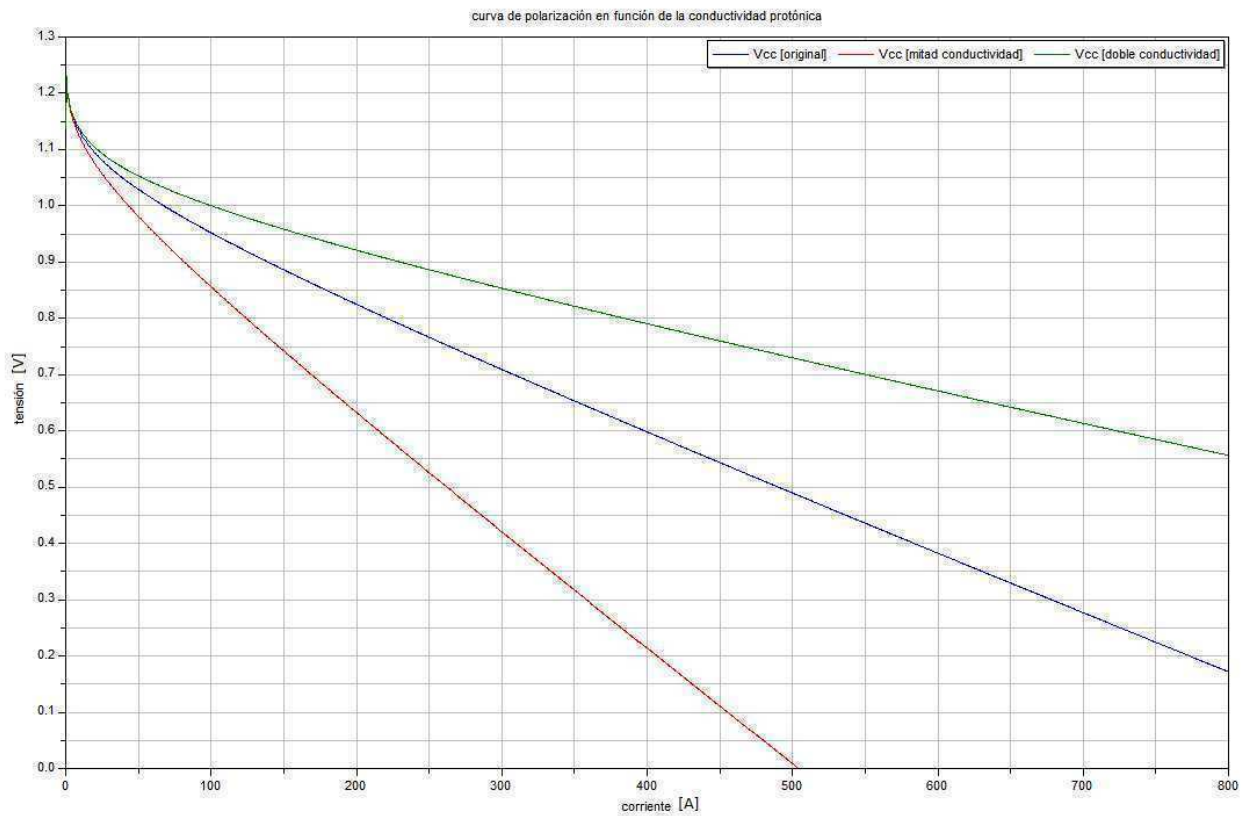


Figura 11 Curva de polarización en función de la conductividad protónica

En la segunda región es donde se notan los efectos de este parámetro. En este caso los efectos son muy importantes pero con matices. Cabe decir que la mayoría del sobrepotencial será generado en la capa catalítica, debido a su baja conductividad. Desde ese punto de vista el diseño de la capa catalítica es muy importante en las características finales de la pila.

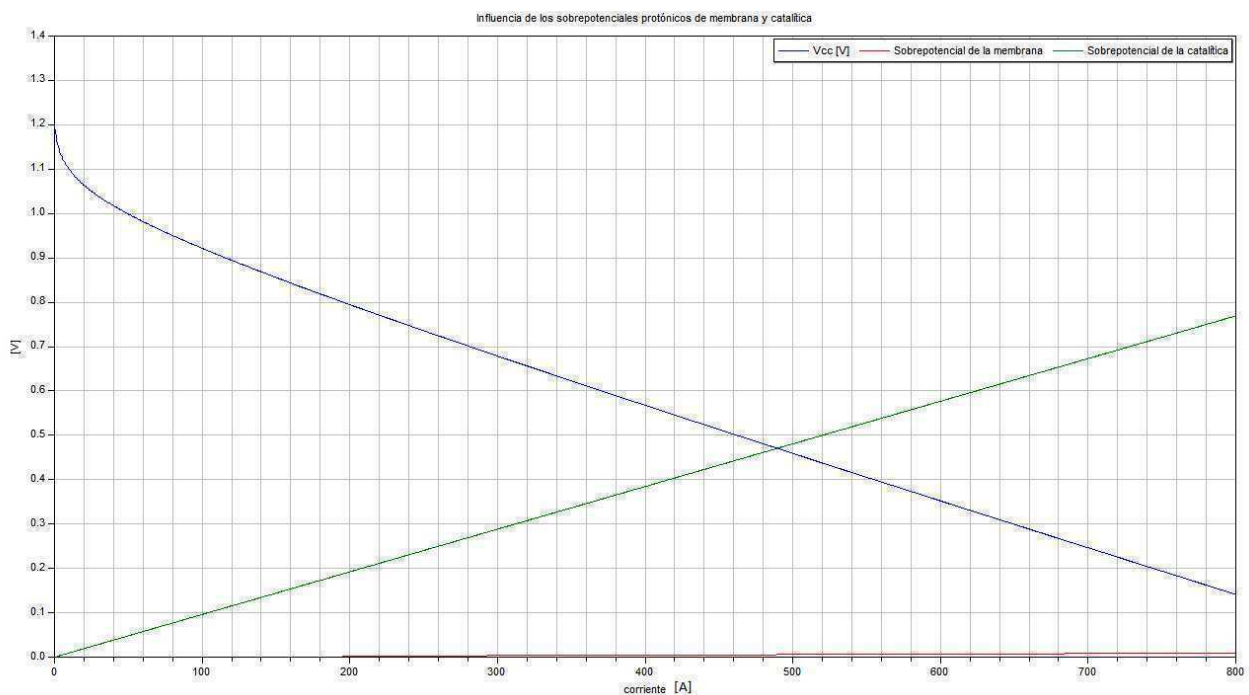


Figura 12 Contribución de los sobrepotenciales protónicos de la membrana y la catalítica

La curva de color rojo muestra la pequeña influencia que tiene la membrana, mientras que la capa catalítica genera un enorme sobrepotencial protónico.

Las conclusiones son que interesa mejorar (incrementando) la conductividad protónica de los elementos de la pila, pero en especial la de la capa catalítica. La influencia de este parámetro es enorme, tanto en intensidad y potencia, como en rango dinámico, y es un factor a tener muy en cuenta.

### 2.3.1.6. La curva de potencia

En muchos de los sistemas generadores que hay en el mercado, la entrega de energía por parte del generador se controla mediante un regulador de carga para operar siempre en el punto de potencia máxima ó PPM.

En la **figura 12** está representada la forma en que la potencia entregada por la pila varía en función de la corriente entregada.

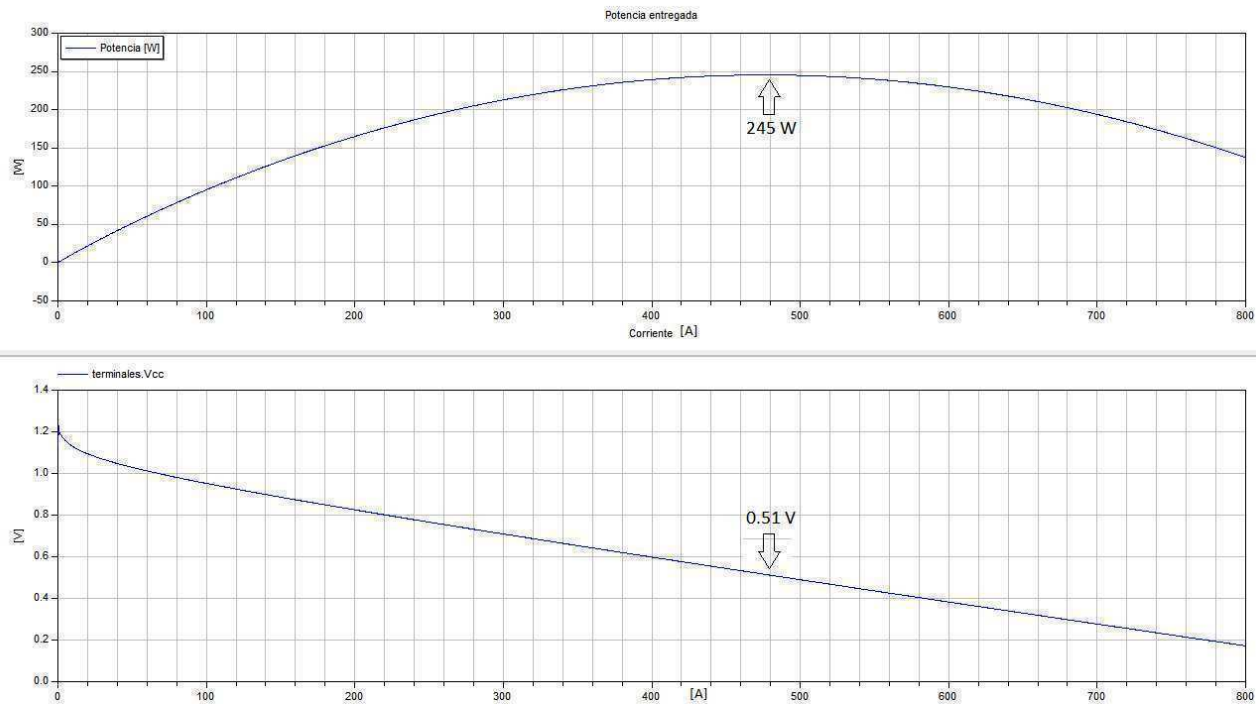


Figura 13 Curva de potencia

Cuando la pila entrega cerca de 475(A) con 0.51(V) se aporta una potencia de unos 245 (W). Éste es el punto en el que los reguladores deberían hacer funcionar a la pila para aportar el máximo de potencia a la red.

El máximo de la curva superior es el PPM, y los reguladores tienen diversos métodos para encontrar este punto sin necesidad de conocer la forma exacta de la curva de polarización de la pila, pero siendo que la forma esencial de dicha curva sea la que mostramos.

En este caso el PPM se encuentra en mitad del rango dinámico, pero su posición exacta puede depender de muchos factores.

## 2.3.2. El defecto de masa en función de diversos parámetros

### 2.3.2.1. Variación en función de la anchura de capa

Todo el análisis de esta subsección se realiza en una pila cuyos parámetros hacen que el defecto de masa sea muy pequeño. En posteriores análisis se comprobará que la caída de presión no es mucho mayor que unos pocos pascales. Si la caída de presión es pequeña, el defecto de masa es pequeño y por lo tanto será representada de forma muy ampliada.

En la sección 2.3.4. se hallan los resultados que ofrece otra pila con parámetros de difusión más pequeños y en dicho modelo se puede observar el defecto de masa en el sobrepotencial. En esta subsección, la influencia del sobrepotencial de concentración  $E_{O_2}$  es pequeña, ese resultado se muestra en este análisis.

La ecuación (2.22) es la responsable del sobrepotencial de concentración. Dicha ecuación está basada en [4] y ajustada para este modelo. En todo caso sus parámetros son completamente configurables para modelar otro tipo de respuesta.

La filosofía de los potenciales está basada en la idea de que su variación responda a la siguiente formas básicas:

$$E_e \text{ y } E_p = f(i)$$

$$E_{\text{act}} = f(\log(i))$$

$$E_{O_2} = f(e^{P_{O_2}})$$

Acto seguido se muestran los resultados del defecto de masa en función de la longitud de las capas.

Estos datos y los siguientes serán tomados con una corriente de 754(A) y tras un tiempo de estabilización de 25(s). En las cabeceras de las gráficas se encuentra el comando MATHEMATICA que las genera y donde se aprecian los valores absolutos de las presiones en pascales.

```
Out[32]= {{21, 99968.3}, {25, 99988.5}, {30, 99989.2}, {35, 99990.5}, {41, 99992.}}
In[35]= ListLinePlot[{{11, 12, 13}, PlotRange -> {{20, 42}, {99985, 99995}}, Mesh -> Full, InterpolationOrder -> 2, AxesLabel -> "Pa", PlotLabel -> "Presión de oxígeno en la capa catalítica"]
```

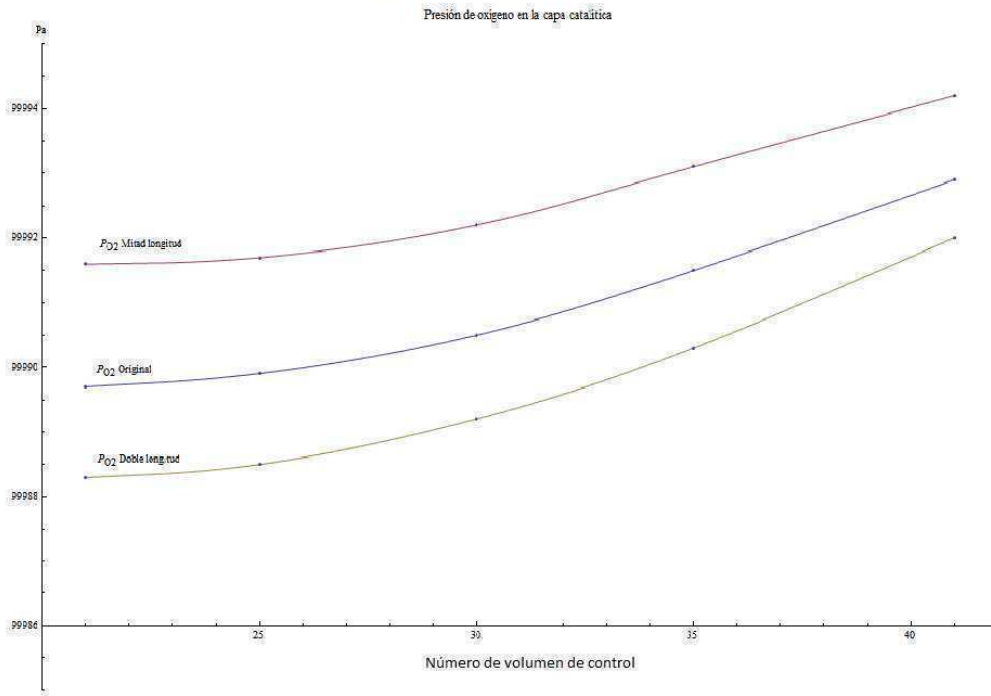


Figura 14 Defecto de masa en función de la longitud de las capas, en el área catalítica. Las abscisas representan el número de volumen de control

Las tres capas fueron modificadas en la misma proporción con respecto a sus valores originales reseñados en las tablas 1 - 3.

Se puede ver que la caída de presión es muy pequeña con los parámetros de difusión considerados; el modelo describe una pila con muy buenas características a este respecto. Las caídas de presión a lo largo del área catalítica son de:

- Longitud original.  $\Delta P=3.2(\text{Pa})$
- Mitad longitud.  $\Delta P=2.6(\text{Pa})$
- Doble longitud.  $\Delta P=3.5(\text{Pa})$

Estas presiones no son suficientes para que se manifieste la tercera región, o zona de pérdidas por concentración y encharcamiento. El valor máximo que va a tomar el sobrepotencial de concentración será de  $\max \{E_{O_2}\} = 0.027 (V)$ .

El otro factor que puede influir a la hora de incrementar el sobrepotencial de concentración es la carga de agua. Ésta se va a mantener en un valor muy cercano al inicial de 0.01. Sigue siendo un valor pequeño como para que sea influyente, pero no es despreciable, puesto que el valor de  $\chi_{rel}$  tiene el diez por ciento de su valor máximo (0.1).

La forma en la que la carga de agua influye en el sobrepotencial de concentración es reduciendo la superficie catódica útil. Dicho de un modo más práctico, la presión efectiva del oxígeno se ve reducida. Las ecuaciones con las que se modela esto son las siguientes.

$$P_{XO_2} = (1 - \chi_{rel}) P_{O_2} \quad (2.26)$$

$$E_{O_2} = \begin{cases} \frac{1}{A} \left( C_1 e^{\left( \frac{P_{O_2}^0}{P_{XO_2} - P_{inf}} \right) - C_2} \right) - C_3 & \forall P_{XO_2} > P_{corte} \\ \frac{1}{A} \left( C_1 e^{\left( \frac{P_{O_2}^0}{P_{conc} - P_{inf}} \right) - C_2} \right) - C_3 & \forall P_{XO_2} \leq P_{corte} \end{cases} \quad (2.27)$$

En el modelo, estos resultados se dividen entre el número de volúmenes de control de la capa catalítica, para hacer un promedio de las contribuciones de esos volúmenes al sobrepotencial total.

Cuando la presión efectiva  $P_{XO_2}$  cae por debajo de la presión de corte  $P_{corte}$ , la contribución de este sobrepotencial es tan grande que llega a anular completamente la fuerza electromotriz.

El transporte de los gases y el agua líquida se realiza en los modelos de transporte mediante las ecuaciones de la subsección 2.2.2., a las que me remito para la descripción matemática de la difusión.

El hecho de aumentar las longitudes de las capas según las ecuaciones referidas en el párrafo anterior, tiene por efecto disminuir el gradiente de presión.

$$-\nabla P \approx \text{discretizado} \approx -\frac{P_2 - P_1}{L_{vc}} = \frac{P_1 - P_2}{L_{vc}} \quad (2.28)$$

Disminuir dicho gradiente en virtud de (2.1) significa que el flujo disminuye y por ende aumentar las longitudes implica disminuir el flujo.

Tratando ahora el tema de la curva de polarización en función de las longitudes de capa, me remito a la subsección 2.3.1.1. en la que se ha tratado este tema. Los efectos en la curva de polarización eran bastante notorios, pero dentro de las contribuciones a dichos efectos destaca el sobrepotencial ohmico, siendo despreciable la influencia del sobrepotencial de concentración.

En definitiva y concluyendo, con las condiciones empleadas, el defecto de masa tiene un efecto muy pequeño sobre la fuerza electromotriz de la pila; al menos con los parámetros de la simulación. Dentro del defecto de masa, la principal contribución la tiene el encharcamiento, haciendo que la presión efectiva del oxígeno se reduzca en un diez por ciento, hasta colocarla cercana a los nueve bares. La caída de presión por difusión es completamente despreciable como se aprecia en la figura 14.

Cuanto más se reduzca la presión efectiva y más se acerque al límite  $P_{\text{corte}} = 65\,000$  (Pa), mayor será este sobrepotencial. En todo caso sus efectos no serán razonablemente visibles hasta el análisis de la subsección 2.3.4.

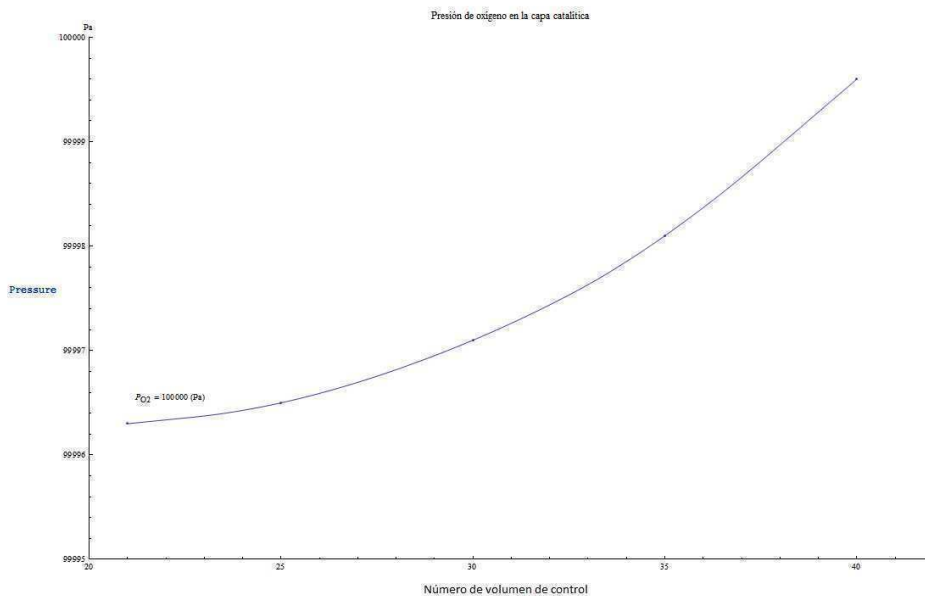
### 2.3.2.2. Variación en función de la presión de oxígeno

El fenómeno de la difusión tal y como está descrito en [3], está sometido al principio del valor máximo. Es por eso que están tanto el valor máximo como el mínimo en las fronteras de cada capa. Se cumple además que el flujo por difusión va a ser proporcional a la presión máxima en la capa frontera, tal y como se intuye en la ecuación (2.28).

Es de esperar, que un aumento de presión de oxígeno signifique una reducción de la diferencia de presión a lo largo de la capa catalítica. En realidad a lo largo de cualquier capa.

```
In[43]:= ll = {{(21, 99996.3), (25, 99996.5), (30, 99997.1), (35, 99998.1), (40, 99999.6)}};
```

```
In[44]:= ListLinePlot[ll, PlotRange -> {{20, 42}, {99995, 100000}}, Mesh -> Full, InterpolationOrder -> 2, AxesLabel -> {"Pa", "Presión de oxígeno en la capa catalítica"} Pressure
```



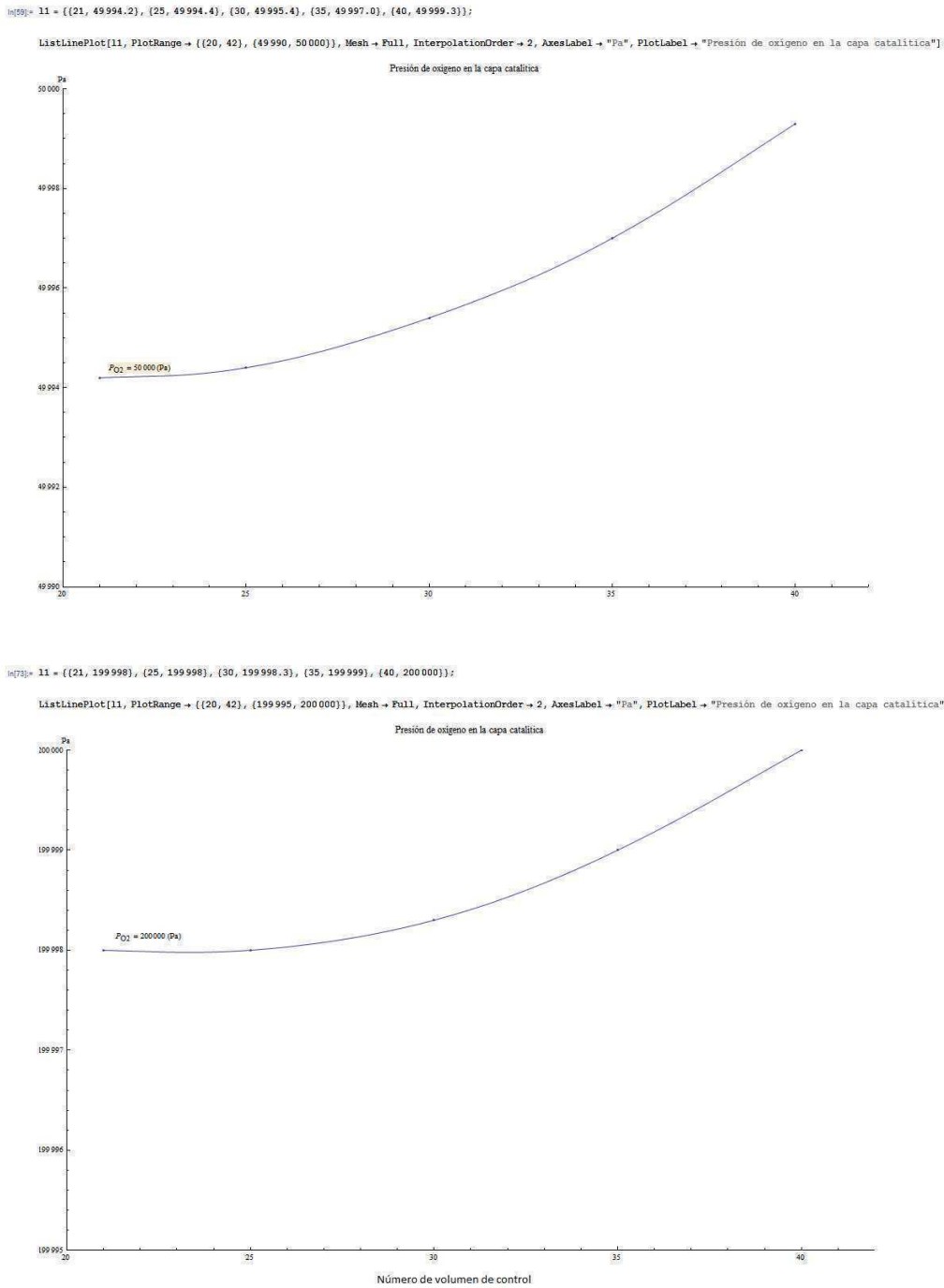


Figura 15 Defecto de masa en función de la presión absoluta del oxígeno

Se puede ver que la caída de presión es muy pequeña con los parámetros de difusión de este modelo; se trata de una pila con muy buenas características a este respecto. Las caídas de presión a lo largo del área catalítica son de:

- Presión original.  $\Delta P=3.3(\text{Pa})$
- Presión mitad.  $\Delta P=5.1(\text{Pa})$
- Doble presión.  $\Delta P=2(\text{Pa})$

Siguen siendo unas caídas muy pequeñas y lo más interesante es que se cumple el análisis cualitativo de más arriba.

Dado que la presión apenas cae, la mayor influencia la sigue teniendo el encharcamiento. Éste reduce en un diez por ciento la presión efectiva del oxígeno, puesto que el diez por ciento en masa de los poros están ocupados por agua.

En lo referente a la influencia en la curva de polarización, un aumento en la presión del oxígeno contribuye a aumentar la fuerza electromotriz de la pila mediante el sobrepotencial de concentración. Cuando la presión de oxígeno supera un valor cercano a la presión de referencia  $P_{O_2}^0$ , el sobrepotencial de concentración invierte su signo y aumenta con ello la fuerza electromotriz. Por el contrario, si la presión de oxígeno es menor que la presión de corte  $P_{\text{corte}}$ , el sobrepotencial de concentración es tan grande que anula la fuerza electromotriz de la pila.

Por todo eso, una de las curvas de polarización no despegas del valor nulo.

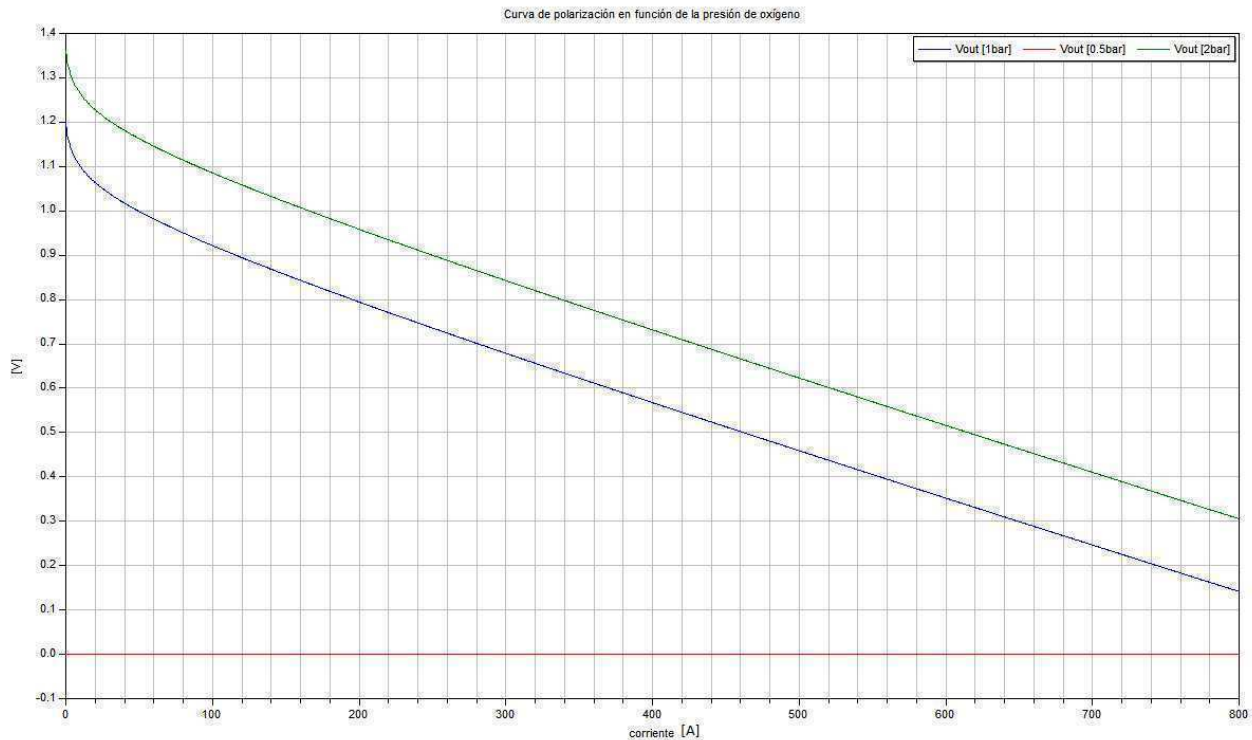


Figura 16 Polarización en función de la presión de oxígeno

La influencia se nota en las tres regiones debido a que la variación en la presión de oxígeno no es debida ni al consumo de la pila ni al fenómeno de difusión. Es debido tan sólo a que la presión aportada es distinta.

No se debe tomar la gráfica de la figura 16 como algo absoluto, ya que los parámetros del sobrepotencial de concentración están especialmente pensados para una presión de entrada de un bar. Además las gráficas de uno y dos bares, deberían converger en el origen hacia la tensión termodinámica de la reacción. Sin embargo eso se puede ajustar disminuyendo  $C_2$  hasta 1.5 y aumentando  $A$  hasta aproximadamente 16. En todo caso eso es ya una mera cuestión de ajustes, siendo el objetivo de este trabajo un modelo que conceptualmente responda a la mayoría de los fenómenos de las pilas de un modo conceptualmente correcto. El resto es tan sólo un trabajo de paciencia y ajustes respecto a la pila por modelar.

Para concluir, las conclusiones aportadas son que la influencia de la presión de oxígeno en el defecto de masa es muy grande, como no puede ser de otro modo. El resultado es que se hace muy importante que la presión de oxígeno sea igual o superior a un bar, manteniéndose lo más alta posible y siempre que la estructura de la pila lo tolere.

Este es sin duda uno de los factores clave en el diseño de una pila PEM.

### 2.3.2.3. Variación en función de la porosidad de sólido $\epsilon_s$ en la capa catalítica

Los siguientes modelos a emplear dentro de la sublibrería de ejercicios, es "defecto\_masa\_porosidad\_solido" y también "defecto\_masa\_porosidad\_solido\_polarizacion".

La ley de Ohm aplicada al transporte protónico y electrónico dentro de los modelos de transporte, tiene esta forma.

$$\Delta V_e = \frac{I_e L_{vc}}{S_{vc} \sigma_e \epsilon_s} \quad (2.29)$$

Esta ecuación discretizada en cada modelo de transporte, calcula el sobrepotencial ohmico electrónico a su través. Lo lógico es entonces pensar que un aumento de la fracción de sólido  $\epsilon_s$ , conlleva una disminución del sobrepotencial ohmico electrónico en las zonas en las que sea aplicable.

Hay otro efecto y es que un aumento de la fracción de sólido conlleva una merma de la fracción de poros.

$$1 = \epsilon_s + \epsilon_{\text{poros}} \quad (2.30)$$

Esa relación afecta a todas las ecuaciones de estado de los gases disminuyendo su volumen disponible, con lo que la dinámica de la presión de los gases es mucho más rápida.

El último factor al que afecta notablemente, es al encharcamiento de la pila. Si los poros son más pequeños, el agua generada o difundida enseguida llenará una fracción apreciable de poro. A continuación, si el poro está encharcado, también se verá mermada la presión efectiva del oxígeno debido a que parte del catalizador está anegado por el agua.

El sobrepotencial de concentración debería aumentar en una pila con los poros más pequeños.

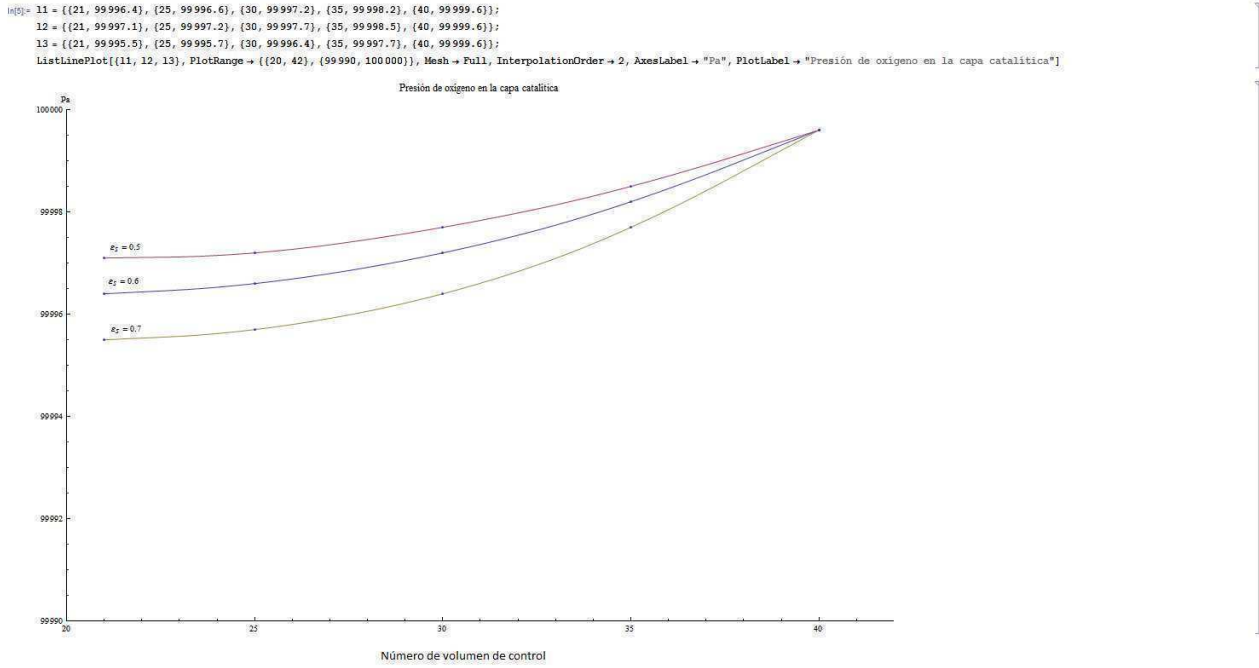


Figura 17 Defecto de masa en la capa catalítica

Las presiones convergen en la frontera porque los cambios sólo afectan a la capa catalítica.

Se puede ver que la caída de presión es muy pequeña con los parámetros de difusión de este modelo; es debido a trabajar con una pila con muy buenas características a este respecto. Las caídas de presión a lo largo del área catalítica son de:

- ε<sub>s</sub> = 0.6 ΔP=3.2(Pa)
- ε<sub>s</sub> = 0.7 ΔP=4.1(Pa)
- ε<sub>s</sub> = 0.5 ΔP=2.5(Pa)

Teniendo en cuenta que aumentar ε<sub>s</sub> significa disminuir los poros, en el momento que se produce un consumo de oxígeno se crea una depresión, que es mayor en el caso de los poros pequeños debido a que contienen menos oxígeno y éste se acaba antes. Como el ritmo con el que se llenan de oxígeno no se ha visto afectado (la difusión tiene los mismos parámetros), los poros más pequeños se quedan con una presión menor, al gastar antes su menor cantidad de gas oxígeno. Eso explica porqué aumentando ε<sub>s</sub> se ve disminuida la presión de oxígeno. La ecuación de estado de los gases apunta en la misma dirección, ya que disminuir la cantidad de volumen de gas en

$$P = \frac{nRT}{V}$$

produce que toda merma en la cantidad de moles de gas, se ve inmediatamente reflejada en una merma de la cantidad de presión. Ésta merma será menor cuanto menor sea el volumen.

El reflejo en la curva de polarización de aumentar ε<sub>s</sub> se aprecia sobre todo mediante el mayor encharcamiento de la pila, y por lo tanto con un mayor sobrepotencial de concentración. Además afecta en las tres regiones puesto que el mayor encharcamiento afecta en todo el rango de corrientes.

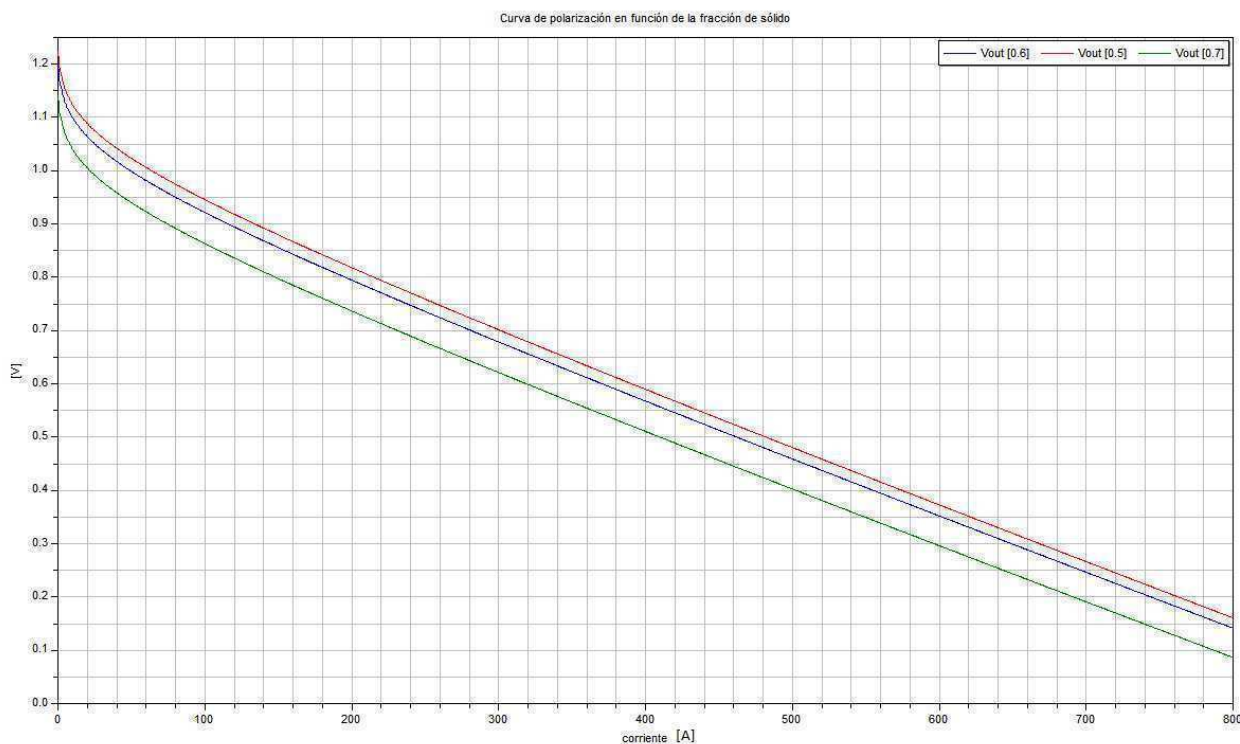


Figura 18 Curva de polarización en función de la fracción de sólido

También afecta el incremento del sobrepotencial ohmico electrónico a través de la ecuación (2.29), pero en un orden de magnitud mucho más pequeño.

La influencia de este parámetro es grande puesto que con la pequeña variación aplicada, se ha obtenido un sustancial cambio en la curva de polarización. Especial influencia tiene sobre todo, el aumento de la fracción de sólido. En conclusión se puede decir que lo más interesante desde el punto de vista del diseño, es que la capa catalítica (en general todas) tengan una fracción de sólido lo más baja posible, o lo que es lo mismo, una porosidad  $\varepsilon_{\text{poros}}$  elevada. Las capas con poros pequeños son propensas al encharcamiento.

Como nota adicional, cabe decir que los coeficientes de difusión de los fenómenos de transporte deberían estar relacionados con este parámetro, puesto que siempre tendrá mayor difusión un material más poroso.

#### 2.3.2.4. Variación en función de la porosidad de electrolito $\varepsilon_e$ en la capa catalítica

En este modelo, las fracciones de sólido y gases están relacionadas mediante (2.30). Sin embargo la relación que pueda tener la fracción de electrolito con las otras, no está definida. Permanece sin relacionar la fracción de electrolito con las otras fracciones, con lo que las variaciones de fracción de electrolito no alteran el volumen de los poros y por lo tanto, los efectos de la subsección anterior se pueden descartar en esta.

Partiendo entonces de esa base, sólo queda una cantidad a la que afectará toda modificación de la fracción de electrolito. Esa cantidad es el sobrepotencial ohmico protónico.

En base a la ecuación (2.11) y adaptándola a este modelo, se obtiene la siguiente ecuación para cada modelo de transporte.

$$\Delta V_p = \frac{I_p L_{vc}}{S_{vc} K_p \varepsilon_e} \quad (2.31)$$

Esta ecuación contribuye al sobrepotencial total en cada modelo de transporte donde exista conducción protónica.

Los resultados que caben esperar de un aumento en la fracción de electrolito, son una disminución en el sobrepotencial protónico. En la subsección 2.3.1.5. se comprobó la enorme contribución del sobrepotencial protónico en la capa catalítica. Lo que cabe entonces esperar es que toda modificación de este parámetro se vea reflejada en una gran variación de la curva de polarización, especialmente en la segunda región.

En lo que a las presiones concierne, todo aumento de  $\varepsilon_e$  implica una merma del sobrepotencial y por ende un aumento de la corriente de línea. Acto seguido, dicha mayor corriente se convierte en mayor gasto de oxígeno y por lo tanto en una menor presión. A resultas de lo expuesto, habrá mayor caída de presión a lo largo de la capa que en casos anteriores.

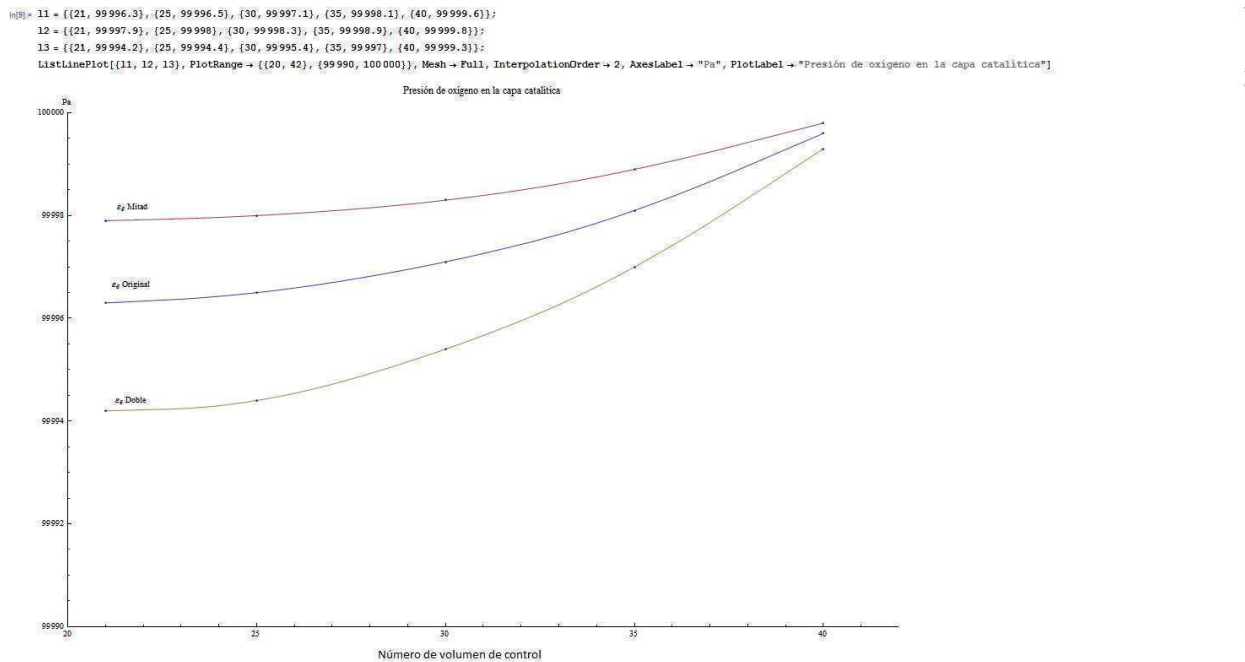


Figura 19 Defecto de masa en función de  $\varepsilon_e$ , que varía con respecto a los valores reseñados en las tablas 1 - 3

Se puede ver que la caída de presión es muy pequeña con los parámetros de difusión de este modelo; este modelo representa a una pila con muy buenas características a este respecto. Las caídas de presión a lo largo del área catalítica son de:

- $\varepsilon_e$  original.  $\Delta P=3.3(\text{Pa})$
- $\varepsilon_e$  mitad.  $\Delta P=1.9(\text{Pa})$
- $\varepsilon_e$  doble.  $\Delta P=5.1(\text{Pa})$

Eso es exactamente lo que reflejan los resultados. Este es el análisis de la curva de polarización al variar la fracción de electrolito.

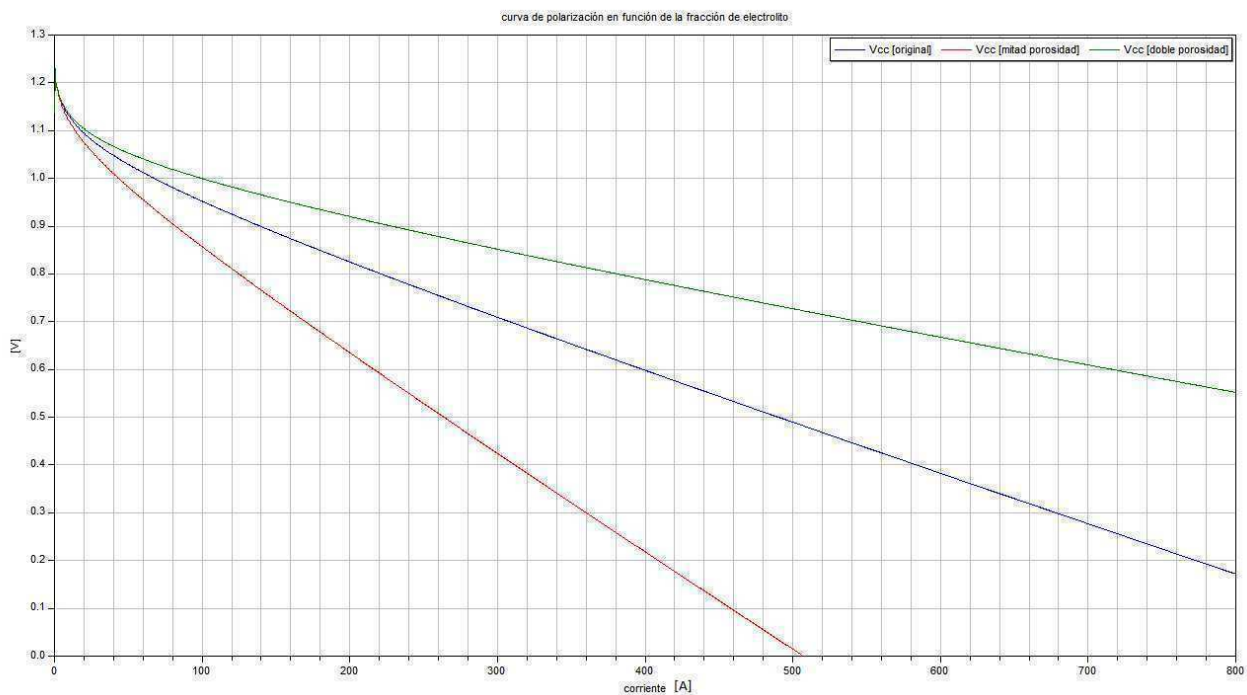


Figura 20 Polarización en función de la fracción de electrolito

Como cabía esperar, los resultados son los planteados. Véase la enorme influencia de ese parámetro en las corrientes y en el rango dinámico de la pila. La conclusión es que este parámetro es uno de los referentes más importantes en el diseño de pilas. Es importante que su valor sea lo más alto posible. Una posible línea de trabajo futura es encontrar la relación que tienen entre sí la fracción de sólido con la carga de agua y con las fracciones de sólido.

### 2.3.2.5. Variación en función del coeficiente binario de difusión $D_{O_2H_2O,g}^{ref}$ en la capa catalítica

Debe hacerse una introducción para aclarar algunos conceptos.

Hay en este modelo dos tipos de difusión. Por un lado está la difusión ordinaria que se manifiesta mediante este coeficiente binario, afectando al oxígeno y al vapor de agua.

Por otro lado está la difusión Knudsen, que afecta a recorridos largos y estrechos en los que las colisiones con las paredes son más probables que las colisiones con otras moléculas del gas.

Luego esos dos valores se promedian en uno solo de la siguiente manera.

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_{ord}} + \frac{1}{D_K} \quad (2.32)$$

$$D_{ord} = D_{ord}^{ref} \left( \frac{P_g}{P_g^{ref}} \right) \left( \frac{T_g}{T_g^{ref}} \right)^{3/2} \quad (\text{difusión binaria}) \quad (2.33)$$

Al margen luego de las posibles variaciones de la difusión ordinaria en función de la temperatura y presión de gas, lo que es menester destacar, es que toda modificación de uno solo de los coeficientes de difusión se ve compensada por el otro coeficiente de difusión de la relación (2.32). En consecuencia, los cambios de un único parámetro de difusión tienen una influencia bastante limitada.

A todo eso hay que añadir que el modelo de este trabajo, tiene unas características de transporte bastante buenas, con lo que en definitiva cabe adelantar que las variaciones en los coeficientes de difusión tienen un escaso efecto, por lo menos en el modo en que aquí se modifican (individualmente).

Todo aumento en el valor del coeficiente binario de difusión, produce una menor caída de presión a lo largo de las capas difusora y catalítica.

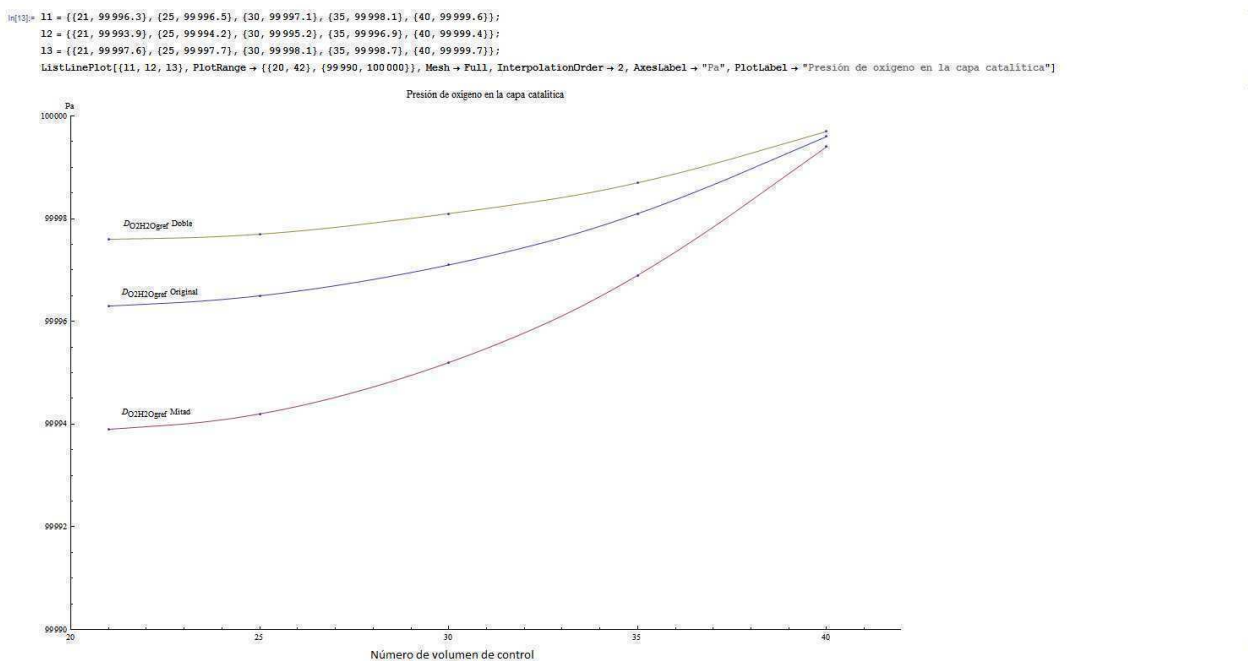


Figura 21 Defecto de masa a lo largo de la capa catalítica, al variar el coeficiente de difusión binario desde sus valores originales

Los resultados concuerdan con los planteamientos.

Se puede ver que la caída de presión es muy pequeña con los parámetros de difusión de este modelo; eso es porque se trabaja con una pila de muy buenas características a este respecto. Las caídas de presión a lo largo del área catalítica son de:

- Difusión original.  $\Delta P=3.3(\text{Pa})$
- Difusión mitad.  $\Delta P=5.5(\text{Pa})$
- Doble difusión.  $\Delta P=2.1(\text{Pa})$

En lo que respecta a la influencia en la curva de polarización, tan sólo hay que fijarse en que a lo sumo se pierden o ganan un par de pascales en la capa catalítica. Eso no va a ser suficiente para contribuir de manera significativa en el sobrepotencial de concentración. También un mayor coeficiente de difusión binario, significa que se desaloja más vapor de agua, con lo que se debería reducir algo la carga de agua, y con ello el sobrepotencial de concentración a través de su término de encharcamiento.

Eso se produce en realidad pero con un orden de magnitud tan pequeño que no se aprecia en las gráficas. El hecho es que la pila modelada tiene en general una buena conducción de gases por difusión, y los cambios en ésta apenas se traducen en significativos cambios de presión o carga de agua.

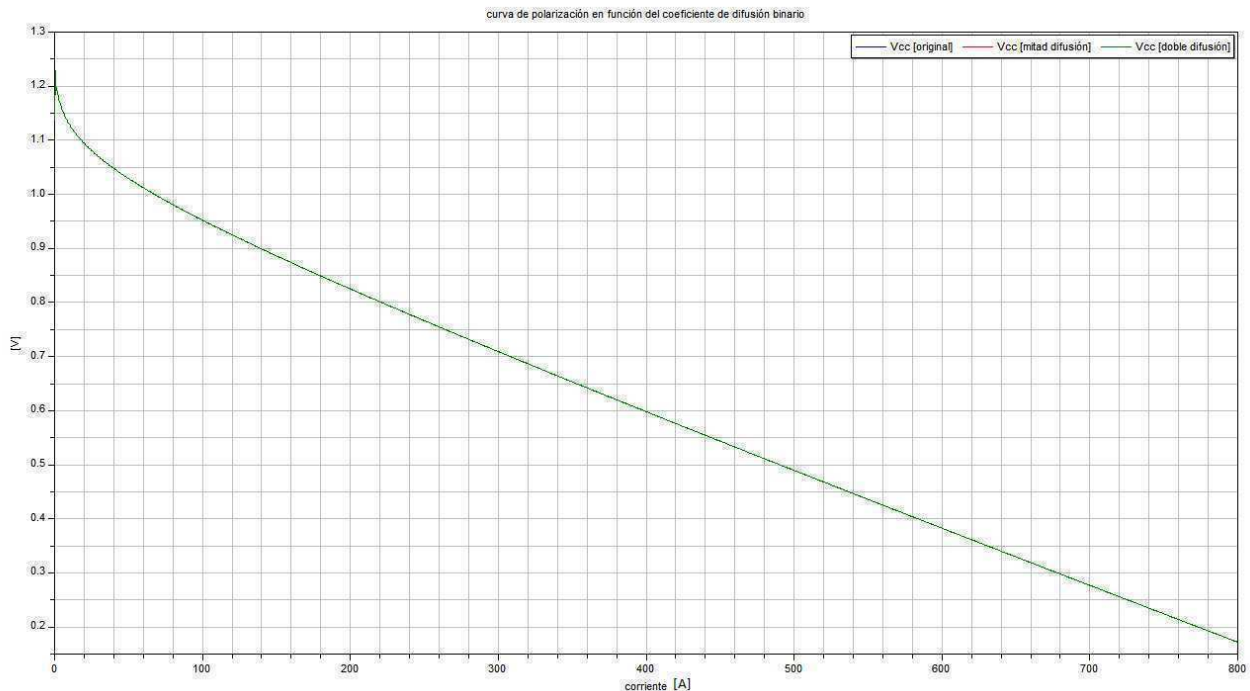


Figura 22 Polarización en función del coeficiente de difusión binario

En los resultados las tres gráficas se confunden debido a su proximidad.

Concluyendo, la influencia de variar el coeficiente de difusión binario, por sí solo, es extremadamente pequeña. Eso si se parte de que los valores originales para este coeficiente eran muy buenos. En 2.3.4. se analiza un caso en el que los coeficientes de difusión son todos a la vez varios órdenes de magnitud menores.

### 2.3.2.6. Variación en función del coeficiente Knudsen de difusión del oxígeno en la capa catalítica

El razonamiento sobre lo que sucederá ante una variación de este parámetro, es análogo al de la subsección anterior. Por eso cuando se aumenta este coeficiente de difusión, resulta que la presión en la capa catalítica es mayor. Otra vez sucederá que la variación en la presión no va a ser mayor que uno o dos pascales.

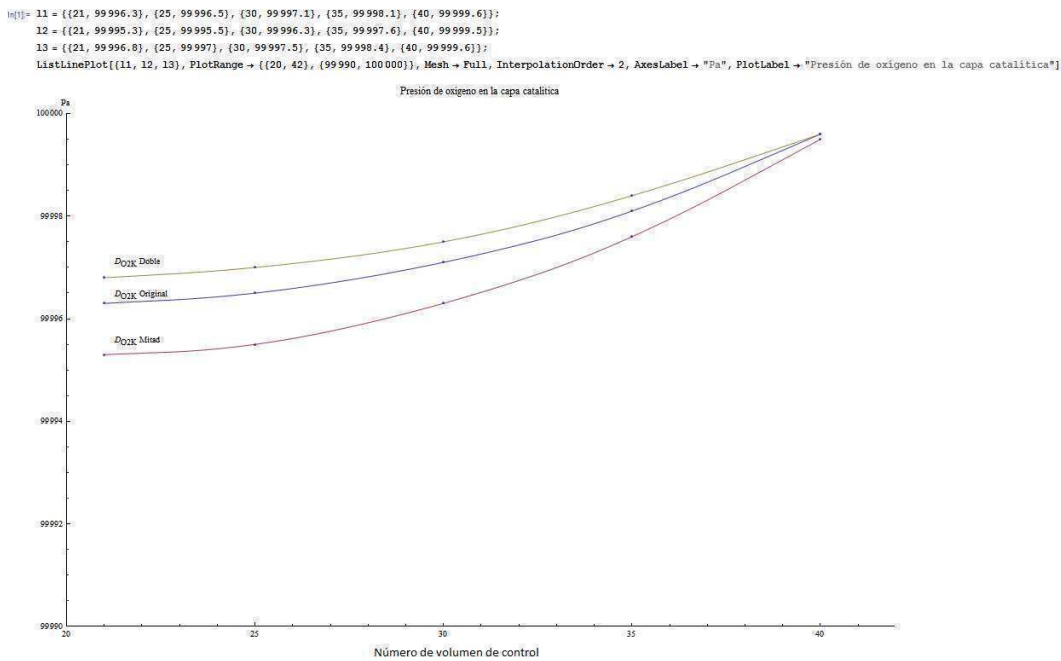


Figura 23 Defecto de masa en la capa catalítica, en función del coeficiente de difusión del oxígeno

Se puede ver que la caída de presión es muy pequeña con los parámetros de difusión de este modelo; se analiza una pila con muy buenas características a este respecto. Las caídas de presión a lo largo del área catalítica son de:

- Difusión original.  $\Delta P=3.3(\text{Pa})$
- Difusión mitad.  $\Delta P=4.2(\text{Pa})$
- Doble difusión.  $\Delta P=2.8(\text{Pa})$

En cuanto a la influencia sobre la curva de polarización se aplica lo mismo que en la subsección anterior, por lo tanto ni la variación del encharcamiento ni la de la presión, serán capaces de aportar cantidades apreciables al sobrepotencial de concentración.

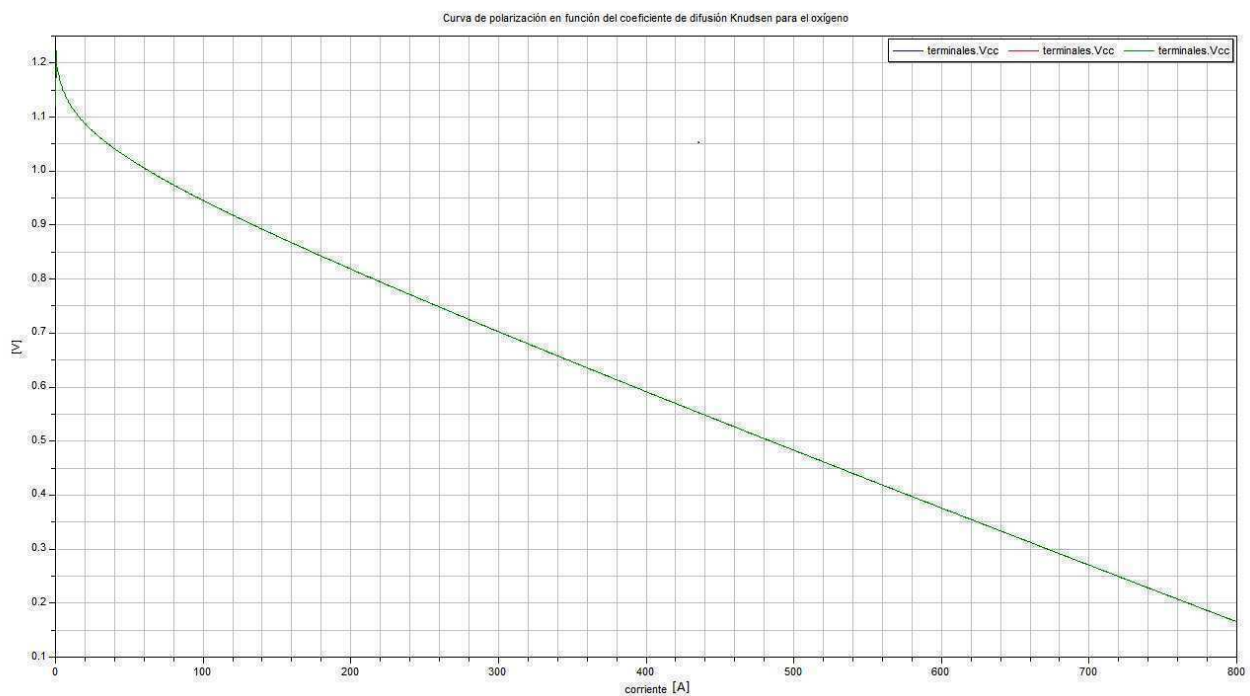


Figura 24 polarización en función del coeficiente Knudsen del oxígeno

Las tres gráficas están tan juntas que se confunden.

En conclusión, las variaciones de este parámetro de forma aislada, no contribuyen significativamente a cambiar la respuesta de la pila ni su rango dinámico. No es un parámetro clave en los órdenes de magnitud en que se mueve.

### 2.3.2.7. Variación en función del coeficiente Knudsen de difusión del vapor de agua en la capa catalítica

Se puede seguir un hilo argumental análogo al de las dos subsecciones anteriores en este análisis, y las simulaciones ofrecen estos resultados.

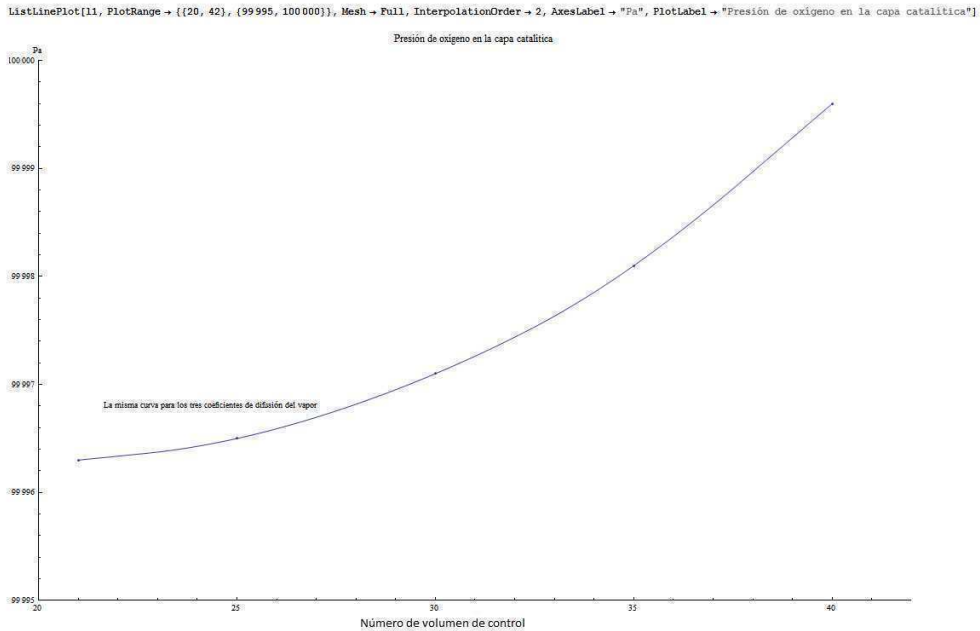


Figura 25 Defecto de masa a lo largo de la capa catalítica

La caída de presión es de 3.3(Pa).

En este caso analizado, las tres curvas son iguales. Eso es debido a que variar el coeficiente del vapor tan sólo afecta a la carga de agua. La evacuación del agua en estado gaseoso es la principal ruta de eliminación del agua de la pila, por lo tanto no se aprecian efectos en las presiones del oxígeno y sí que se percibe una ligera variación de la carga de agua. Aún así, la variación en la carga de agua no será suficiente para que tenga influencia apreciable en la curva de polarización.

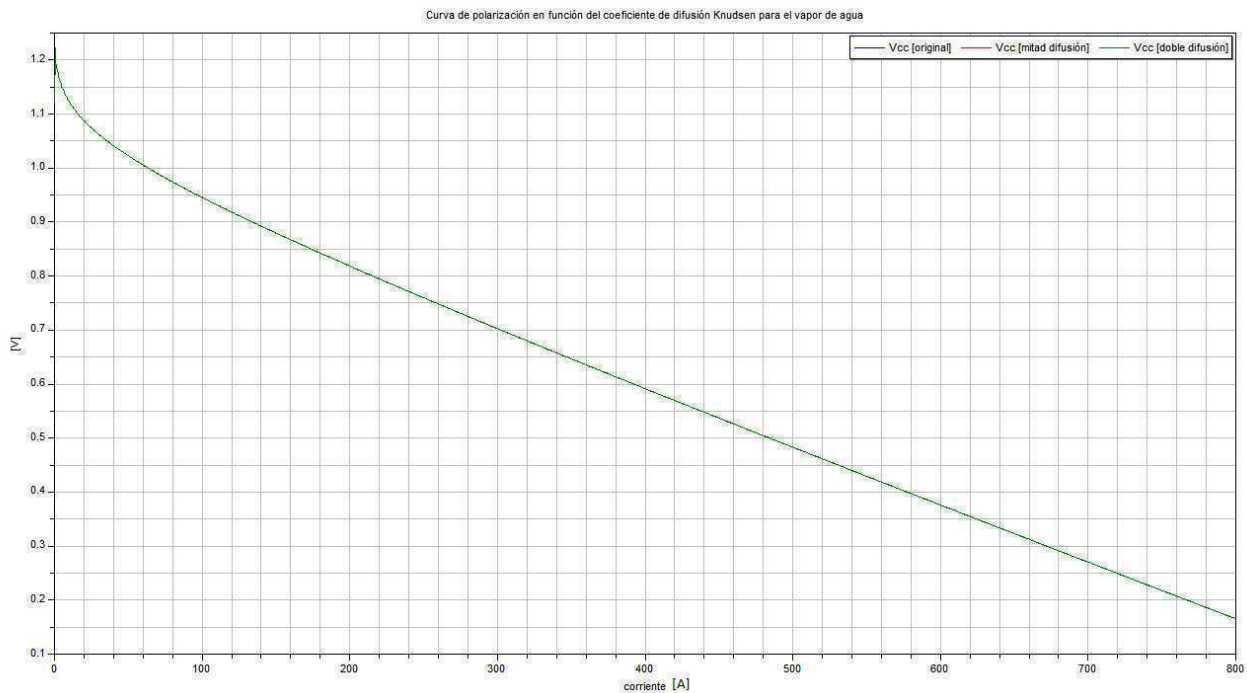


Figura 26 polarización en función del coeficiente de difusión del vapor de agua

### 2.3.2.8. Variación en función del área de pila

Es un análisis interesante comprobar en qué medida afecta el área de pila al defecto de masa o a las curvas de polarización.

Con respecto al defecto de masa se cumplirá que tener menos sección implica un menor flujo entre volúmenes de control, pero también significa una menor cantidad de agua y gases en ellos. El balance global hará que la dinámica de una pila con un área menor, sea la misma que la dinámica de otra con área mayor.

Sin embargo, en el momento en que se produce un consumo eléctrico se produce un consumo de oxígeno, con lo que las presiones de oxígeno bajarán. Esas mermas en la presión de oxígeno serán tanto más acusadas cuanto menor sea el área de pila, por eso lo que sucederá es que cuanto menor sea el área de la pila, mayor será el defecto de masa.

Hay otro factor importante, las resistencias electrónica y protónica. En este respecto, una disminución del área significa un aumento de la resistencia, lo que se manifestará en la segunda región de la curva de polarización. Según (2.25) y (2.24), la caída de tensión en los modelos de transporte es inversamente proporcional al área, tal como ha sido comentado.

A medida que la corriente aumente, los sobrepotenciales ohmicos se convertirán en la primera causa limitadora de la corriente y el rango dinámico de la pila. No se puede esperar que una pila de 25 (cm<sup>2</sup>) ofrezca la misma corriente que otra de un metro cuadrado. En muchos textos no se ofrece la corriente de la pila, sino su densidad. Se puede comprobar que en definitiva este último parámetro es el que aproximadamente se conserva.

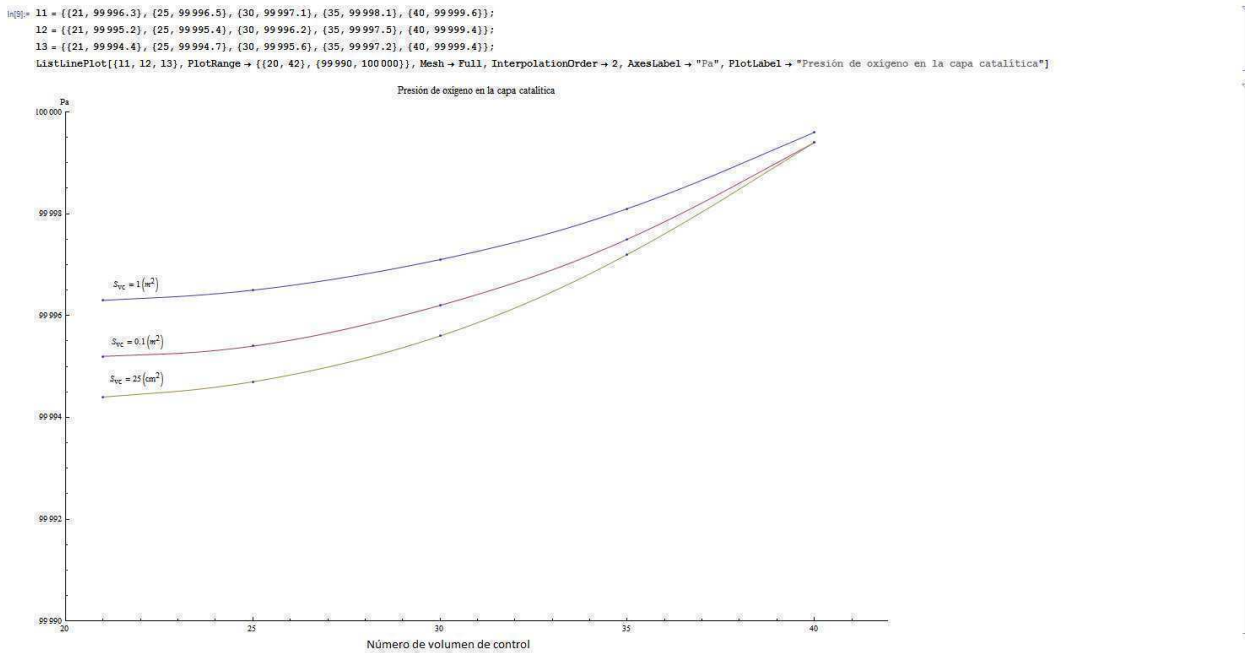


Figura 27 Defecto de masa en función del área de pila

La prueba de que la variación de la sección no afecta a la dinámica de la difusión es que en la frontera de la capa catalítica las tres curvas de presión parten de aproximadamente el mismo punto, eso es por la misma capacidad de transporte en la capa difusora. También se comprueba que en las pilas de área menor el defecto de masa se acrecienta, pero sin ser un valor determinante en las características de la pila.

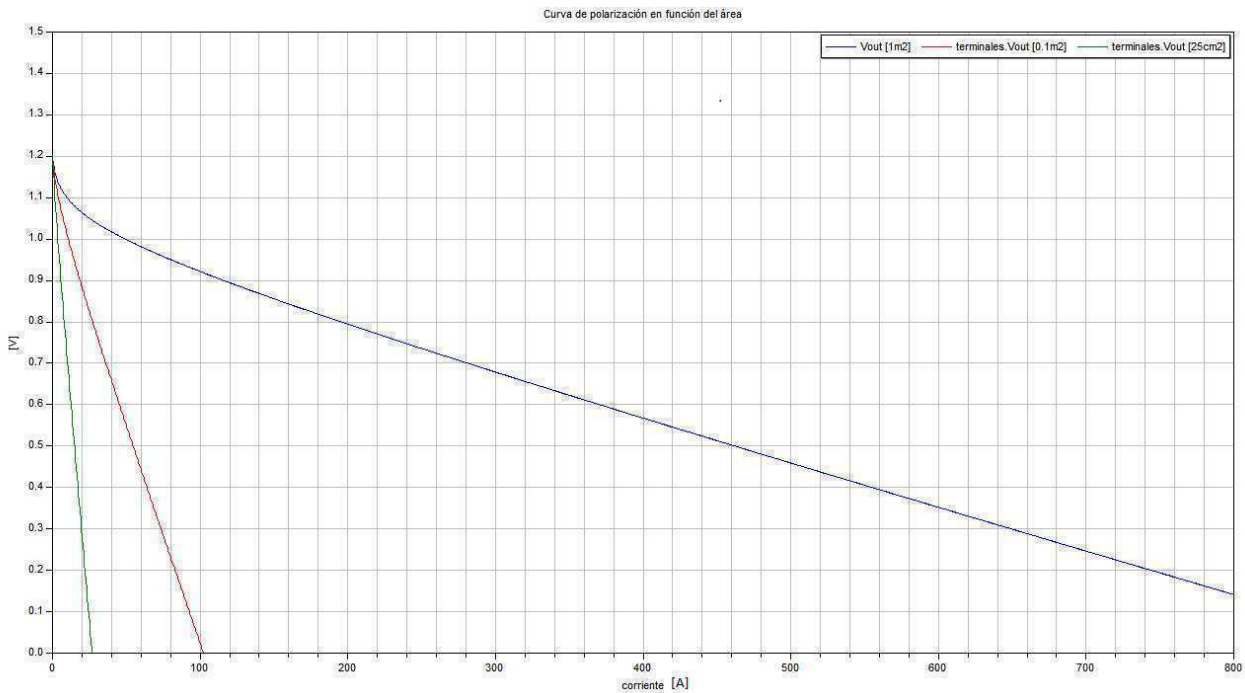


Figura 28 Polarización en función del área de pila

Las tres pilas tienen su punto de potencia máxima en torno a los  $50 \left( \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right)$  lo que confirma que la densidad de corriente en las tres pilas es bastante constante, en especial en la segunda región. Puede haber diferencias en la tercera región, y en las pilas de pequeña área la segunda región se superpone a la primera, siendo dominante en todo el rango dinámico. En las gráficas roja y verde de la figura 28, se puede apreciar que en su forma esencial son rectas, faltándoles la curvatura propia de la región de activación. Eso es porque el sobrepotencial ohmico (en especial el protónico) enseguida se convierte en mucho mayor que los otros, en mayor proporción cuanto menor sea el área de pila.

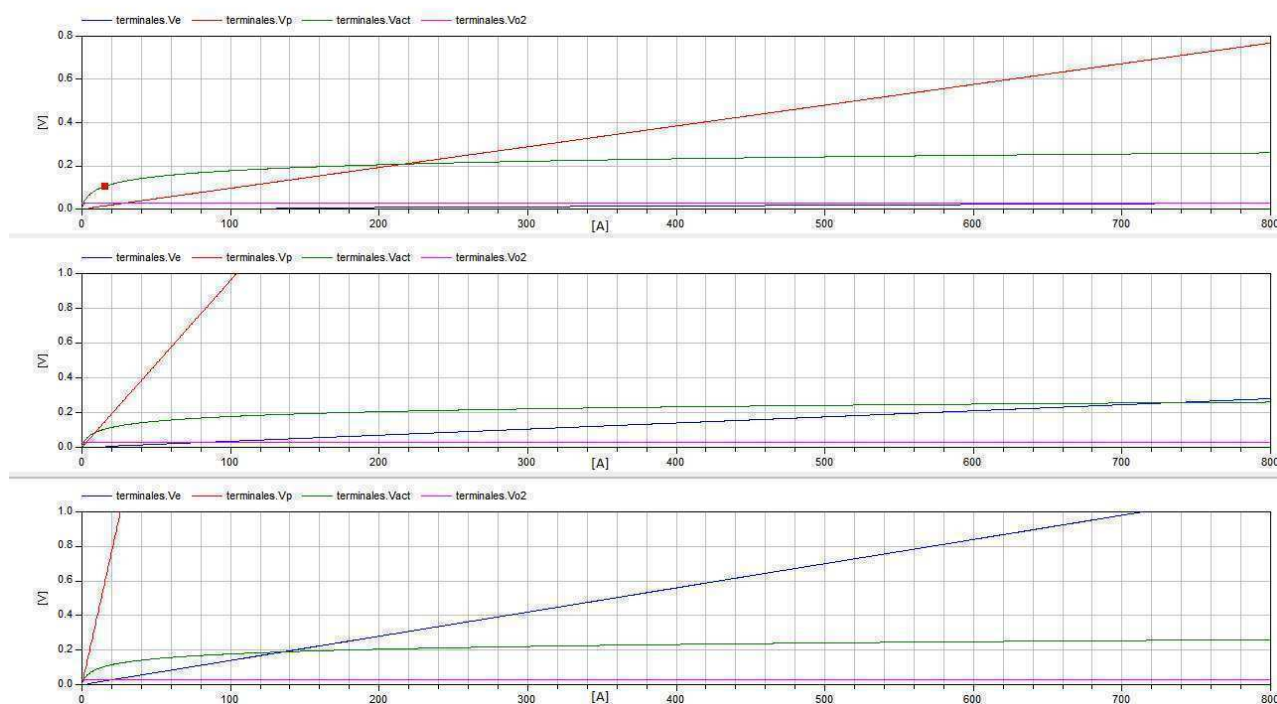


Figura 29 Comparación de los sobrepotenciales en las tres pilas

En la **figura 29** se aprecia muy bien cómo los efectos ohmicos son más importantes cuanto menor es la pila, haciendo que la segunda región invada a las otras dos y convirtiendo en rectas las curvas de polarización.

En conclusión, se debe decir que las pilas con área grande son necesarias para ofrecer elevadas corrientes, siendo un factor de diseño muy importante desde el punto de vista de diseño del generador (la instalación completa) pero no de la pila.

También cabe señalar que es prácticamente equivalente en términos de generación, tener un solo generador de doble área que tener dos generadores en paralelo de área unitaria. Las diferencias pueden luego residir a la hora de la refrigeración.

### 2.3.3. El encharcamiento del cátodo en función de diversos parámetros

#### 2.3.3.1. Variación en función de la anchura de capa

Sea una breve introducción de lo que sucede con el agua en la pila.

En los poros de cada capa se puede encontrar: vapor de agua, agua líquida y oxígeno. El agua está cambiando de estado en función de la presión en los poros y de la temperatura. En la pila modelada en este trabajo, se va a cumplir lo siguiente.

- El vapor de agua tiene mucha facilidad para atravesar las capas, siendo su dinámica muy rápida y los tiempos de asentamiento alrededor de 1 segundo.
- El agua líquida tiene una dinámica muy lenta, con tiempos de asentamiento de más de 15 minutos.
- Las condiciones de contorno (carga de agua) en el modelo "terminales" son las mismas que las condiciones iniciales en las capas. Eso simula el proceso de hidratación de la membrana. La dinámica de los volúmenes de control intentará lentamente alcanzar dicho valor.
- La cantidad de agua que cambia de estado es pequeña en comparación con la que escapa por difusión en cualquiera de los dos estados.
- La principal vía de escape de agua es en forma de vapor. Especialmente el agua generada en la reacción.
- Se puede decir que el agua líquida y el vapor, se difunden cada uno según su método de forma aproximadamente independiente. Por lo tanto el vapor de agua se escapa como vapor de agua y el agua líquida como agua líquida, siendo pequeña la contribución de escape del agua líquida mediante el fenómeno de la evaporación; al menos a esa temperatura.

Con lo dicho, se deduce que la manera principal de evacuación del agua líquida de los poros, es la difusión líquida. Este proceso tiene un coeficiente de difusión muy pequeño, lo que va a ser responsable de los largos tiempos de asentamiento en la evacuación del agua en estado líquido.

Sin embargo el agua de reacción se produce en forma de vapor, con lo que debido a la naturaleza de esta pila, será rápidamente evacuada (en forma de vapor), siendo mínimo el cambio de estado por un aumento de la presión de vapor de agua.

Tras esta breve introducción, se analiza lo que sucede con la fuerza electromotriz cuando hay aplicados consumos elevados durante un tiempo de algo más de 15 minutos.

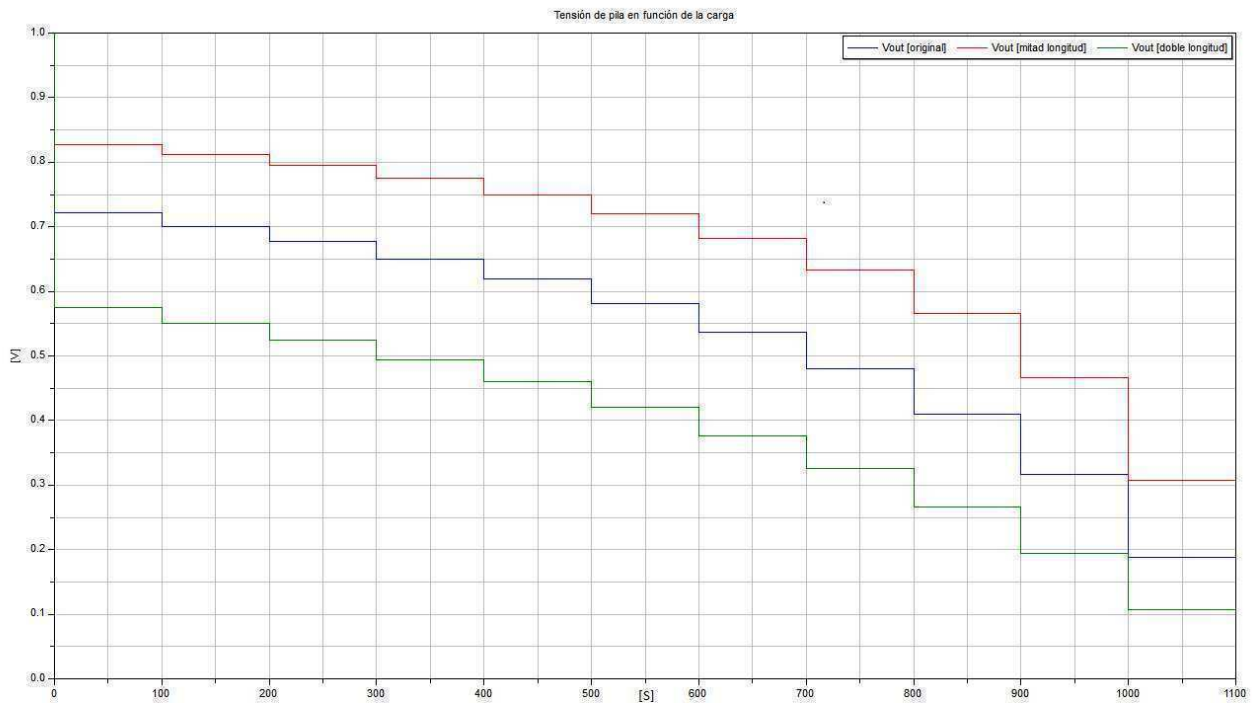


Figura 30 FEM en función de la longitud de las capas

En esta simulación se aplica una carga variable en forma de escalones; sirve para apreciar los transitorios de carga y con ello la evolución de la carga de agua entre otros efectos.

Lo primero que se aprecia es que todo aumento de la longitud de las capas equivale a una merma de la FEM. Eso es debido sobre todo a pérdidas ohmicas, tal y como está descrito en 2.3.1.1. y 2.3.2.1.

El sobrepotencial de concentración engloba a los efectos de defecto de masa y encharcamiento, y es muy pequeño en comparación con los otros sobrepotenciales.

El sobrepotencial de activación depende de la intensidad de pila, pero es prácticamente igual en los tres casos.

El sobrepotencial ohmico electrónico es en todos casos muy pequeño.

Es el sobrepotencial ohmico protónico, en especial en la capa catalítica, donde está la principal causa de variación en la FEM.

Para comprobar que las pérdidas por encharcamiento no son apreciables, tan sólo nos basta con mirar la forma de los escalones de la figura 30. En el caso de que éstos sean planos los efectos del encharcamiento no son apreciables, mientras que si están curvados la evolución temporal del encharcamiento mediante su sobrepotencial ha influido significativa, distorsionando la forma plana original. La tercera región ha invadido a la segunda en los escalones deformados.

Debido a que esta pila tiene muy buena difusión para los gases, el vapor de agua de reacción escapa con facilidad y por ende no se generan cantidades apreciables de agua líquida por condensación. La cantidad de agua líquida en la pila es casi constante y además el defecto de masa es muy pequeño. Todo eso hace que las pérdidas por encharcamiento, y en general, el sobrepotencial de concentración no afecte significativamente a la FEM ni a la forma plana de los escalones.

Los sucesos destacables que ocurren en los poros cuando se aumenta la longitud, son los siguientes.

- El flujo de gases que escapan del cátodo es menor, a resultados de (2.28) y (2.1).
- El flujo de agua líquida que escapa del cátodo se dirige a la difusora, que proporcionalmente está más seca por su mayor porosidad.
- Hay más cantidad de moles de vapor y también de presión de vapor.
- Es prácticamente constante (al menos relativamente) el número de moles de agua líquida y su flujo fuera del cátodo.
- El flujo de gas es unos 6 órdenes de magnitud mayor que el de agua líquida.
- La velocidad de evaporación, del orden de  $10^{-10}$ , es despreciable frente a los flujos. Eso confirma que en su mayoría el agua líquida escapa como líquida, y el vapor como vapor.

Se ha aplicado una carga de agua inicial de 0.01 a las tres capas por igual. En el caso de que se aplicase una  $\chi$  menor a la difusora se observarían transitorios debidos al proceso de secado de la capa catalítica. Esos transitorios se pueden apreciar simulando en tales condiciones, y su efecto es distorsionar la forma de los escalones. Esa distorsión no sería fruto del encharcamiento sino del secado, y se soluciona dando tiempo a la pila para que alcance su estado estacionario antes de aplicar la carga. En definitiva eso sólo sirve para que se pueda apreciar el hecho de que la variación de  $\chi$  en la capa catalítica se aprecia como una deformación de los escalones. Además la duración de esos transitorios es de más de 15 minutos.

Al fin y al cabo, este es un trabajo de análisis y no de ajuste. Para simular alguna pila concreta bastaría con ajustar los parámetros.

En conclusión, la influencia de la longitud de las capas sobre el encharcamiento (en el estado estacionario) es bastante pequeña. Por el contrario, contribuye a aumentar el tiempo de los transitorios. En esta pila el encharcamiento no es un problema porque el vapor de agua se difunde muy bien, siendo éste el principal modo de escape del agua de reacción. La evacuación del agua líquida es un fenómeno algo lento ( $T_s \approx 15$  (min)) que se puede dejar ver como transitorios.

### 2.3.3.2. Variación en función de la porosidad del sólido $\varepsilon_s$

Toda vez que se aumenta la fracción de sólido, la carga de agua no varía pero sí que lo hace la carga relativa. Eso es debido a la disminución de volumen de poros, con lo que  $\chi_r$  aumenta.

También tiene otro efecto, disminuye el volumen disponible para los gases y hace que el transporte de gases por difusión se vea dificultado, fruto de la disminución de  $\varepsilon_s$  en (2.1).

Eso es en principio, porque en la hora de la verdad los niveles en los que se va a mover la carga de agua no son suficientes para influir negativamente en el flujo de gases. La porosidad del sólido  $\varepsilon_s$  debería aumentar mucho para que se noten sus efectos.

Además, la misma definición de capa difusora hace referencia a un material muy poroso y no al contrario.

El análisis y simulación que sigue, mostrará que incluso duplicando la fracción de sólido, no aparece un fenómeno de encharcamiento significativo.

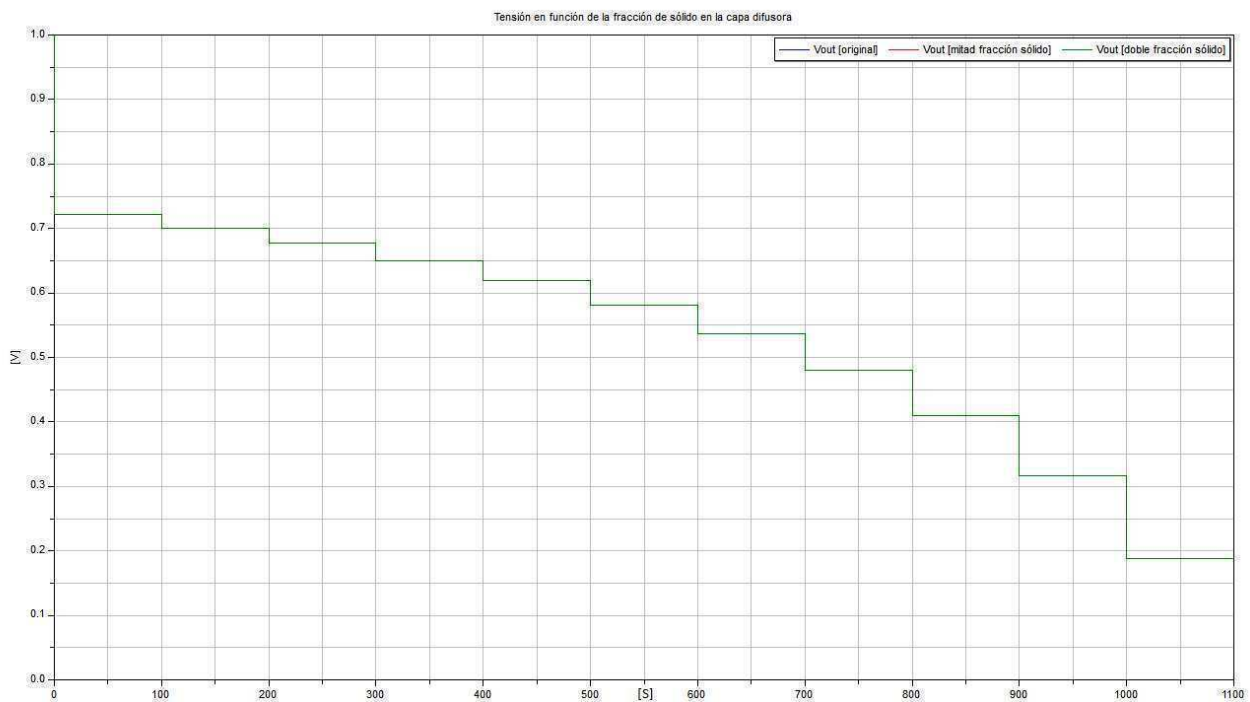


Figura 31 FEM en función de la fracción de sólido, aplicando carga en escalones.

Las tres gráficas coinciden, con lo que se demuestra la pequeña influencia de este parámetro en la fuerza electromotriz de la pila.

Se espera que con un volumen de poros menor, la difusión deba ser menor. Aún así y todo, la diferencia es poca.

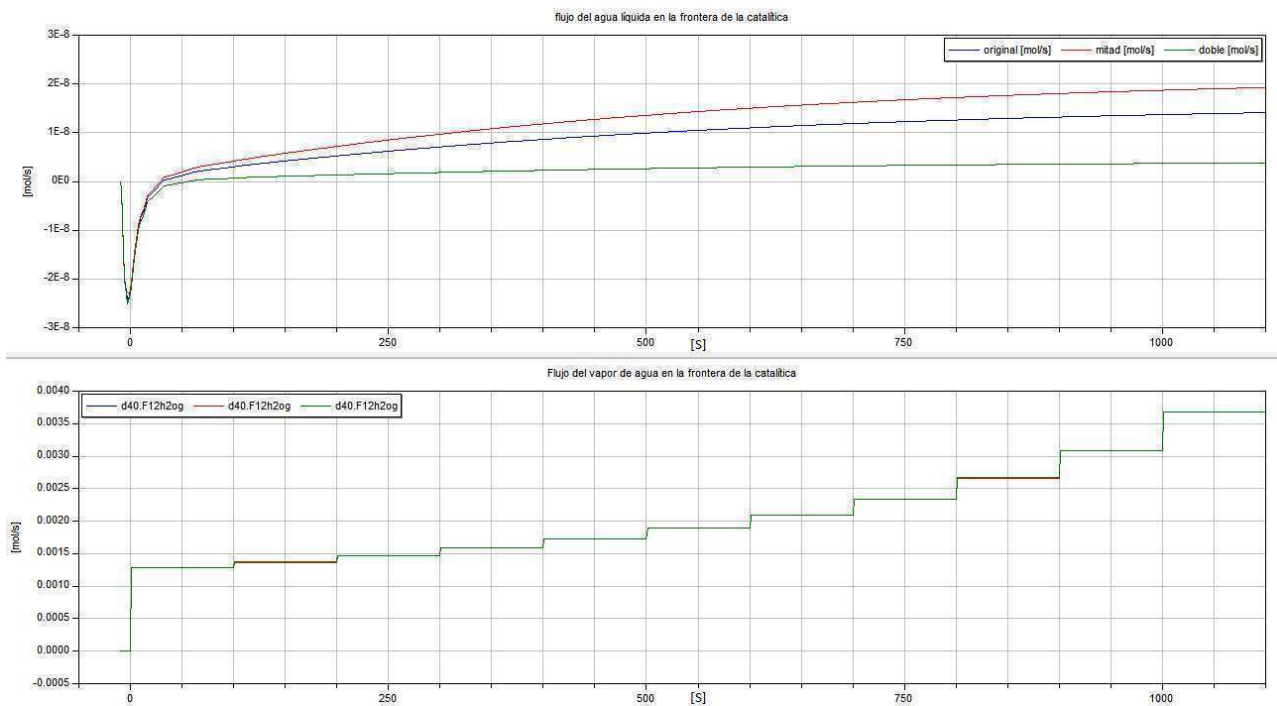


Figura 32 Flujos en función de la porosidad del sólido

Aumentar la porosidad del sólido, en efecto significa disminuir el volúmen de poros y con ello los flujos. Se puede ver que la variación relativa en el flujo de gases es inapreciable (figura 32 inferior), con lo que el vapor de agua de reacción escapa sin problemas.

En lo relativo al agua líquida no debería haber mucha diferencia, pues su flujo está vinculado a las concentraciones de agua. La causa principal de que aumente el flujo cuando la fracción de sólido disminuye (aumentan los poros) es que la capa difusora está más seca al tener más poros. Se explica porque la presión de vapor de agua es menor y se evapora el agua líquida. Entonces baja ligeramente  $\chi$ , y con ello el agua de la capa catalítica fluye hacia la difusora.

En definitiva con los parámetros de esta pila, se puede concluir que la influencia de este parámetro en el encharcamiento no es un factor decisivo en el diseño, teniendo mucho margen para maniobrar.

Como última nota aclaratoria, recordar que las condiciones de contorno de la capa difusora con el modelo terminal imponen un  $\chi$  de 0.01. En el caso de que fuese menor, como suele ser el caso, la influencia de este parámetro sería aún menor.

### 2.3.3.3. Variación en función del coeficiente Knudsen de difusión del vapor de agua

Con todo lo dicho hasta ahora, se puede preveer que los resultados de este subapartado no van a ser relevantes en el análisis. Para poder apreciar alguna variación en las presiones y tensiones, las variaciones a aplicar deben ser de unos cuatro órdenes de magnitud. En este experimento tan sólo se emplea la horquilla del doble a la mitad, con lo que la variación relativa es muy pequeña.

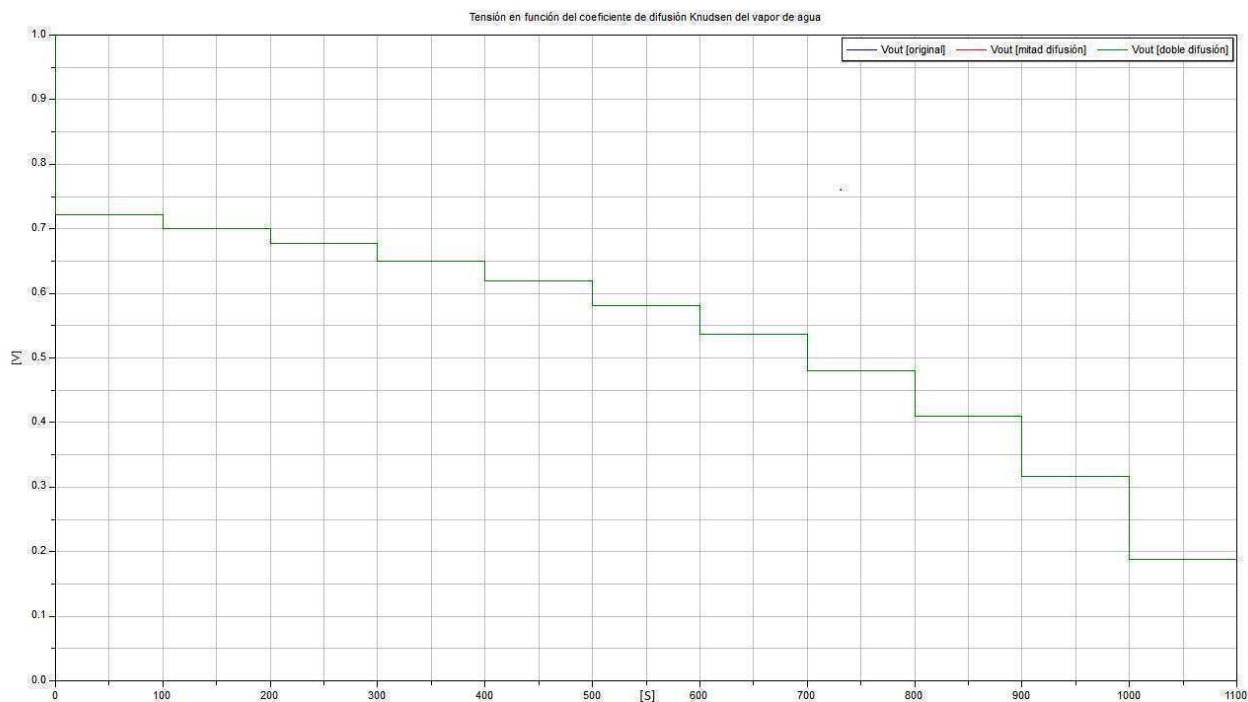


Figura 33 FEM en función del coeficiente de difusión del vapor de agua

Las tres gráficas están tan próximas que no se aprecia diferencia. Además los escalones son planos, con lo que la influencia del fenómeno de encharcamiento en la pila no es importante, al menos desde el punto de vista de este parámetro. Se aplica lo dicho en la sección 2.3.2.5. con respecto a que las variaciones en la difusión Knudsen se ven compensadas por la difusión ordinaria. Además según (2.1), el sentido en el que reacciona el flujo de gases ante un incremento del coeficiente de difusión, es creciendo.

En conclusión, este parámetro por sí solo no afecta en modo significativo al funcionamiento de la pila, al menos no en los órdenes de magnitud en los que se mueve.

#### 2.3.3.4. Variación en función del coeficiente de difusión del agua líquida

La difusión del agua líquida se calcula en función de las concentraciones, en lugar de las presiones. A partir de (2.4) discretizada Se obtienen.

$$C_i = \frac{N(H_2O - l)}{V_{vc}} \left( \frac{\text{mol}}{l} \right)$$

$$F = -S_{vc} D \frac{(C_2 - C_1)}{L_{vc}} \left( \frac{\text{mol}}{s} \right) \quad (2.34)$$

Con esa definición, la difusión del agua líquida no depende sino de sí misma y sus condiciones de contorno y parámetros.

Para este análisis, en la frontera de la capa difusora con los "terminales" se ha bajado la carga de agua a la mitad, de resultas se aprecia un mayor flujo de agua líquida y por lo tanto una mayor influencia en el sobrepotencial de concentración.

El objetivo de dicho cambio es poder ver una influencia más apreciable, y a su vez, para que las condiciones de contorno sean un poco más realistas, haciendo que la capa difusora elimine más cantidad de agua.

Los efectos que se aprecian son tan sólo transitorios. En definitiva la influencia de este parámetro sobre la FEM en estado estacionario son también muy pequeños por las razones dadas en 2.3.3.1. , siendo la principal la escasa transición entre estados. Los tiempos de asentamiento para este tipo de difusión son superiores al cuarto de hora, razón principal de que lo observado sean transitorios.

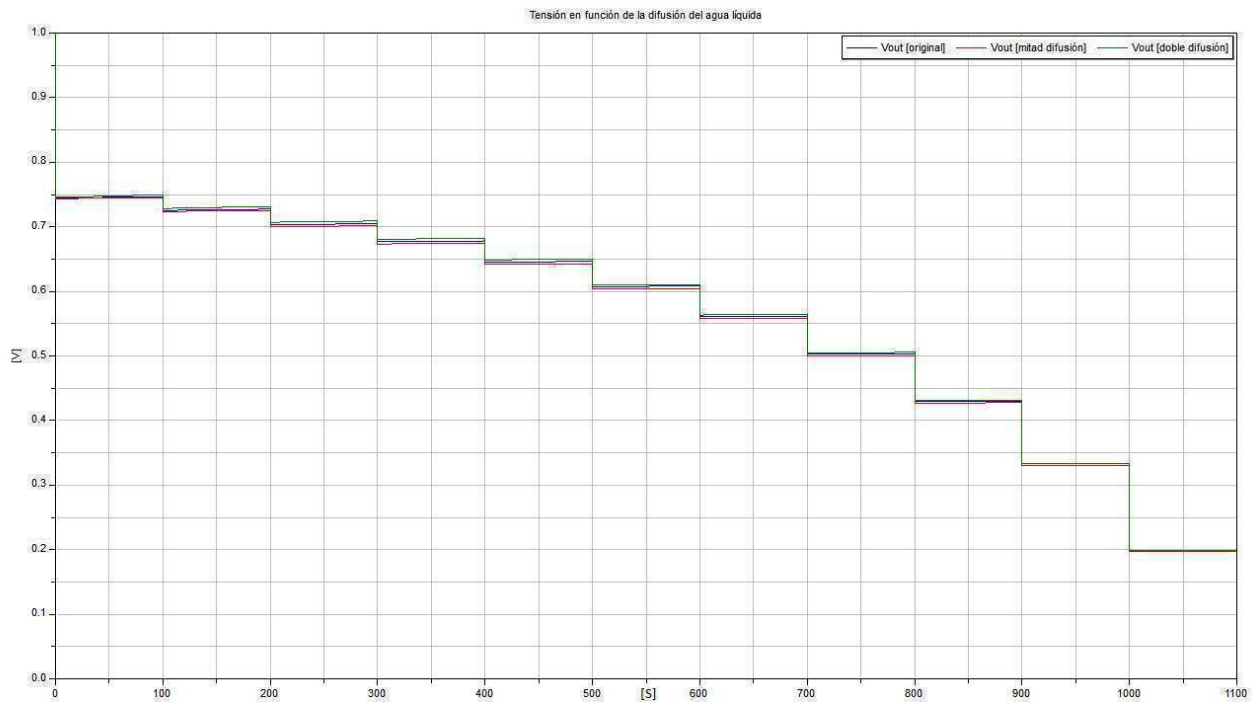


Figura 34 FEM en función del coeficiente de difusión del agua líquida

En el análisis de esta subsección, se aprecia la distorsión en la forma de los escalones propia de los efectos de la carga de agua a través del sobrepotencial de concentración. Pero la prueba de que son sólo transitorios es que la distorsión afecta a los primeros escalones, siendo los últimos de más intensidad y sin embargo son los más planos.

La forma de los escalones varía porque se está produciendo un secado de la capa catalítica a través de la difusora. Eso hace que el sobrepotencial de concentración disminuya o incluso se haga negativo (aunque pequeño).

Es importante el hecho de que la gráfica verde converge más rápidamente que la roja a la azul. Eso es porque con un coeficiente de difusión mayor, los transitorios duran menos.

Con un tiempo de simulación bastante mayor se podría apreciar que en definitiva las tres gráficas son prácticamente iguales, lo que confirmaría que la influencia en el estado estacionario de este parámetro es pequeña, sea la corriente que sea; por supuesto debido a la bajísima condensación del vapor de reacción en agua líquida.

Al verse los transitorios de tensión se comprueba que el encharcamiento se manifiesta mediante distorsión de los escalones.

El flujo de agua que atraviesa las fronteras de la catalítica es el de la figura siguiente.

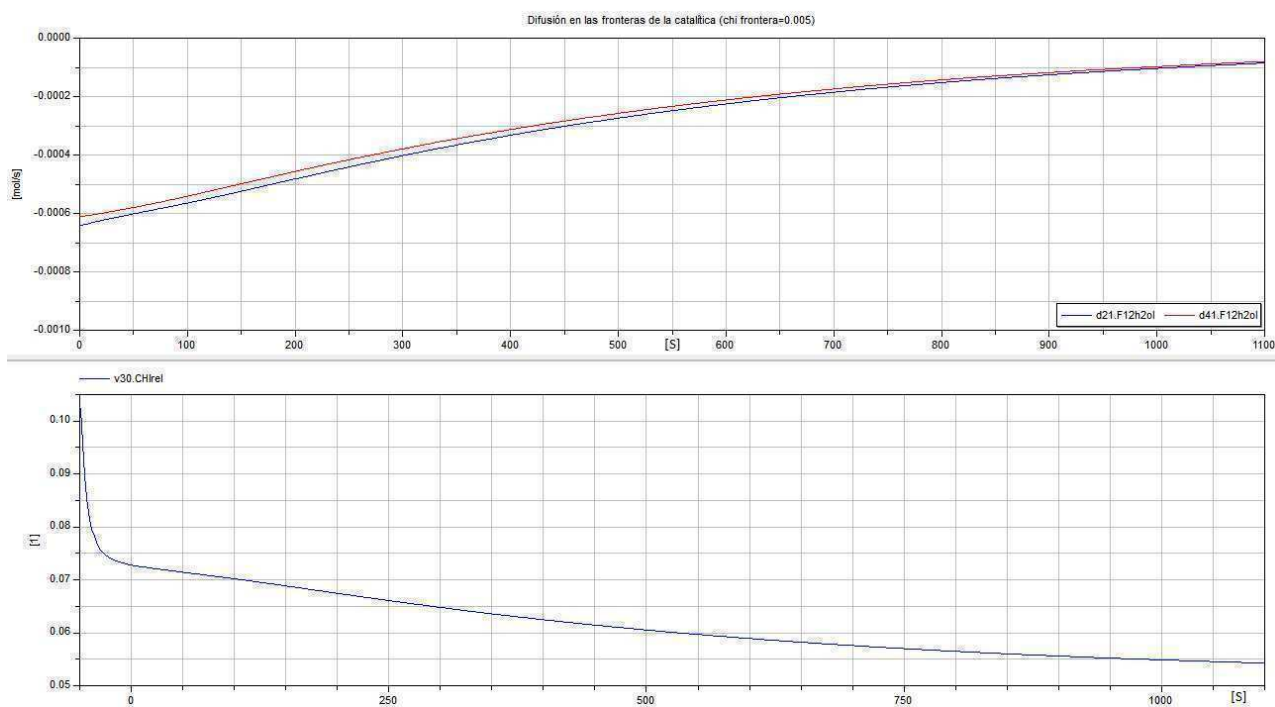


Figura 35 Flujos en las fronteras de la capa catalítica

Se aprecia un flujo proveniente de la membrana y que atravesando la catalítica, es transportado por la difusora hacia el exterior. Tanto la capa catalítica como la membrana, especialmente esta última, necesitan estar hidratadas para favorecer la conducción protónica. El flujo de agua es parte de los mecanismos de hidratación de las pilas PEM.

En la gráfica inferior, se aprecia el proceso de secado en la mitad de la capa catalítica. Ese es el transitorio mencionado anteriormente y que afecta a la forma de los escalones. La forma de ese transitorio no está condicionada apenas por los escalones de corriente. En efecto no se aprecian escalones en la evolución de la concentración de agua ni en la de los flujos. Otra confirmación de que las corrientes generadas, aún siendo elevadas no tienen apenas influencia en la concentración de agua en la capa catalítica por las razones ya argumentadas. Es así que aunque se varíe el coeficiente de difusión del agua líquida, los resultados (transitorios aparte) permanecen iguales.

La conclusión es que la principal influencia de este parámetro está precisamente ahí, en los transitorios. Aumentar este parámetro disminuye los tiempos de asentamiento de las concentraciones de agua en la capa catalítica. Sin embargo puede ser apresurado decir que interesa un coeficiente de difusión lo más alto posible. Si el coeficiente es muy alto, es posible que la catalítica o incluso la membrana se sequen demasiado rápido y se vea afectada para mal la conductividad protónica.

Podría aumentarse su valor con resultados positivos pero dentro de un pequeño margen, además hay que tener en cuenta que la influencia de este parámetro sobre la FEM es pequeñísima y la influencia de la conductividad protónica es enorme. Se trata de un valor adecuado y no determinante en los órdenes de magnitud en que se mueve.

### 2.3.4. Un caso especial: Breve análisis de una pila con coeficientes de difusión menores

Para analizar un caso especial, a continuación se trabaja en el funcionamiento de una pila con una menor difusión de los gases.

- Cabe esperar, que tanto el defecto de masa como el encharcamiento sean mucho mayores.
- El rango dinámico será menor, igual que la FEM.
- La tercera región será por fin apreciable en las curvas de polarización (y no sólo como transitorios).
- La transición de estado del agua mediante condensación del vapor de reacción, aún siendo mayor, no es un término a considerar.
- El defecto de masa será considerable a partir del PPM.
- Se han reducido cuatro órdenes de magnitud los coeficientes de difusión en las capas catalítica y difusora, y uno el de la membrana, referido sólo a los gases; el coeficiente de difusión de los líquidos permanece inalterado.

Los resultados de la simulación arrojan esta curva de polarización.

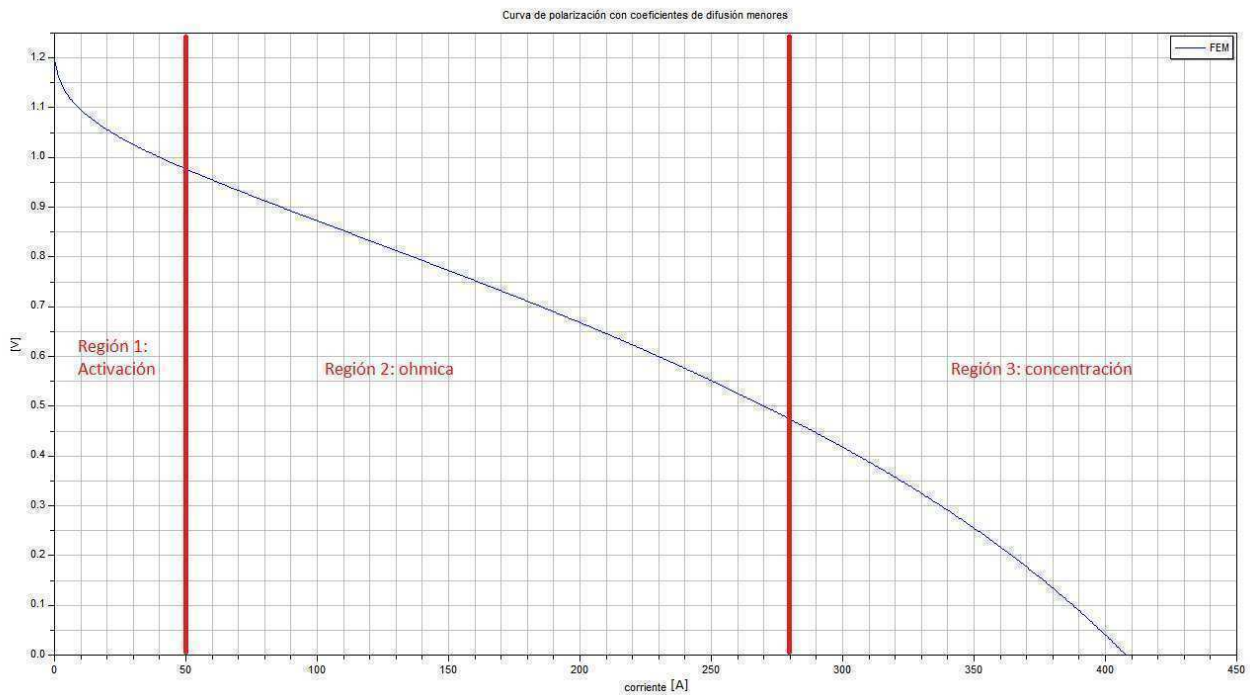


Figura 36 Curva de polarización con coeficientes de difusión mucho menores

La influencia en la potencia entregada es considerable, siendo ahora mucho menor el PPM.

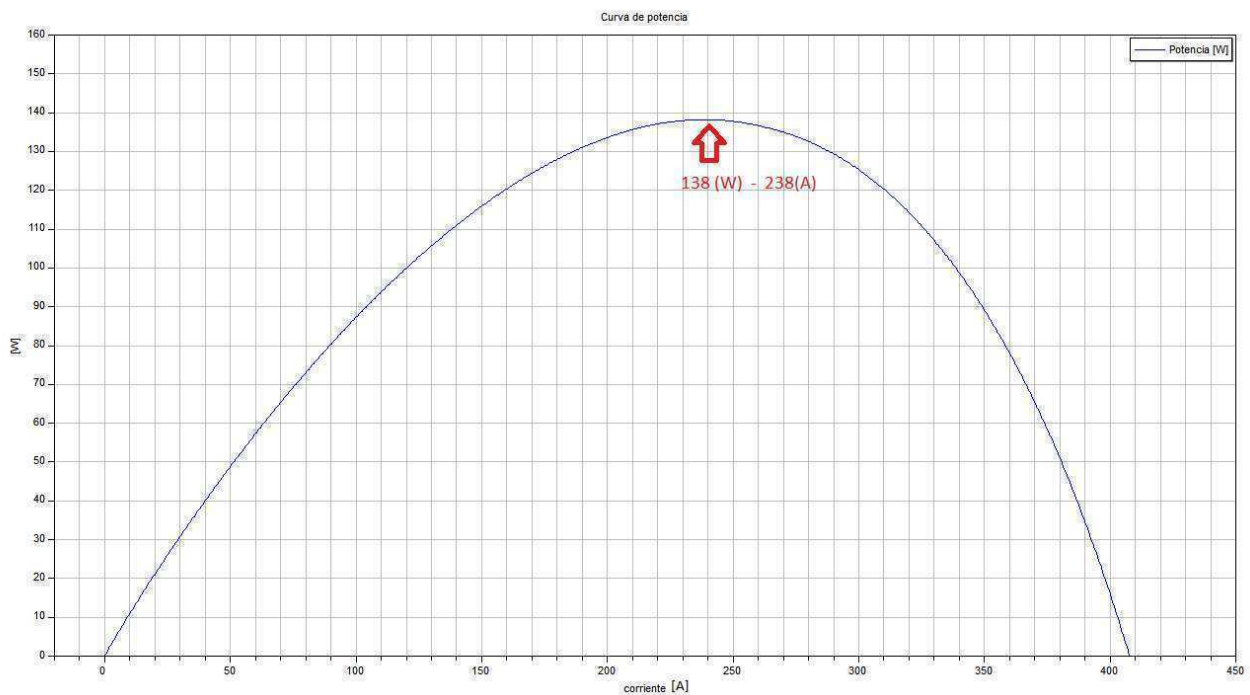


Figura 37 Curva de potencia

Ha variado tanto en su forma, como en la cantidad de potencia (menor) que ahora se entrega.

La presión de vapor de agua aumenta linealmente con la corriente, y en cantidad mayor que antes. También el defecto de masa es mucho más apreciable.

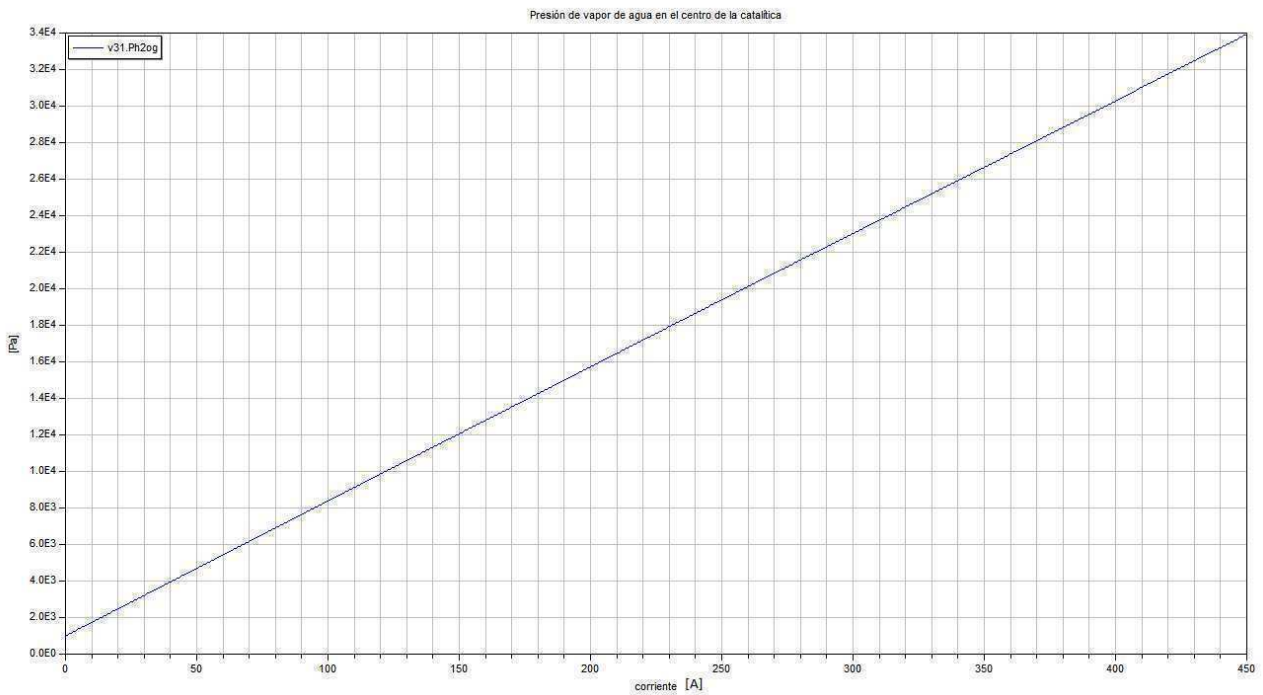


Figura 38 Presión de vapor

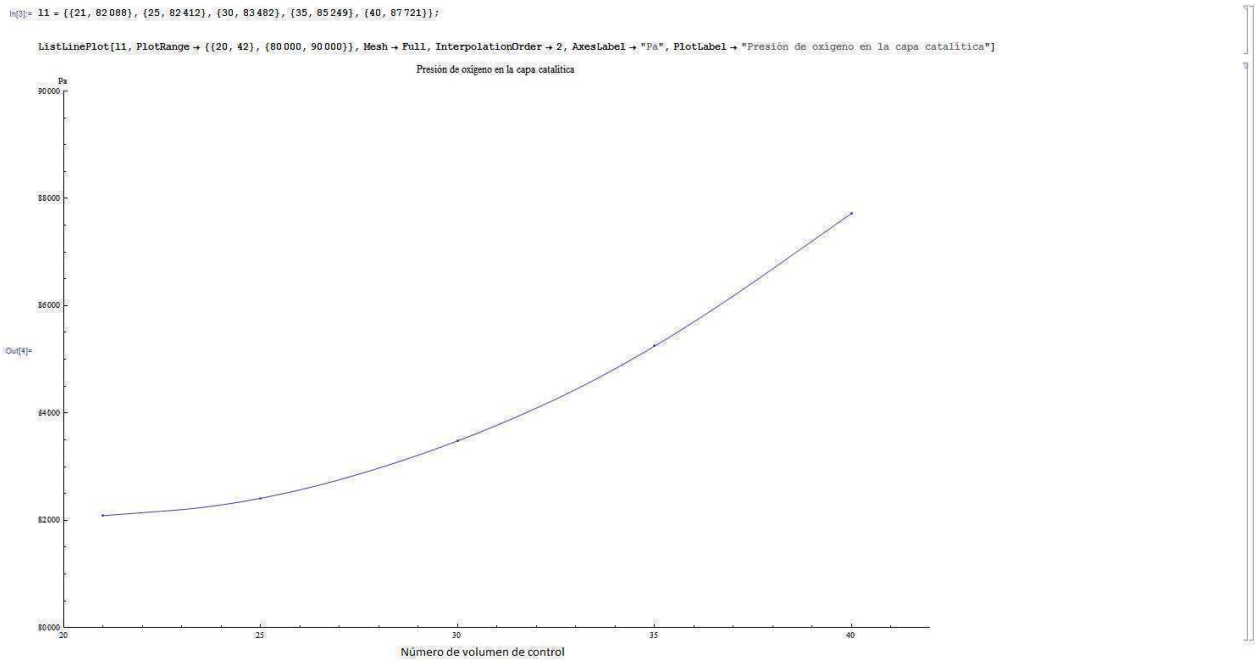


Figura 39 Defecto de masa

Esta es la razón principal de pérdidas en la tercera región, el defecto de masa. El encharcamiento se sigue manteniendo constante, y aunque la condensación es ligeramente mayor, no lo es tanto como para ser un factor a tener en cuenta.

Con este análisis se ha comprobado que son necesarios cuatro órdenes de magnitud en la merma de los coeficientes de difusión de los gases para que las pérdidas de la tercera región sean visibles. En todo caso se aprecia con claridad cómo la porosidad de las capas, a través de sus coeficientes de difusión, es determinante a la hora de uno de los resultados más importantes que se espera de una pila PEM: la entrega de energía.

---

## 2.4. Resumen y conclusiones

Se acaba de analizar una posible célula PEM que tenía unas propiedades impuestas.

Ha ofrecido una serie de datos cualitativos y cuantitativos, siendo en especial importantes éstos últimos. Es especialmente importante y desde luego esa ha sido la finalidad de este trabajo, el conseguir un modelo matemático programado en MODELICA que sea fiel a la mayoría de los comportamientos que una pila real pudiera tener.

Se ha obtenido un modelo que funciona mucho mejor que aquel basado en [1] y [2], del cual partía este primer modelo contenido en la librería "celula\_pem". Ahora el modelo funciona bastante bien, y aunque se puede seguir trabajando en él y mejorando facetas, los resultados ofrecidos por el modelo son bastante buenos. Éstos describen muchos de los comportamientos que cabe esperar para una pila PEM.

Se debe hacer énfasis en alguno de esos resultados.

- Existencia de tres regiones en la curva de polarización, debido a que fenómenos distintos se manifiestan en regiones distintas de la curva de polarización.
- Una correcta evolución de los datos de los modelos en el sentido que cabe esperar ante la variación de la mayoría de los parámetros aquí analizados.
- Análisis exhaustivo de la evolución de tres fenómenos o características fundamentales: Curva de polarización, defecto de masa y encharcamiento.
- Separación de las ecuaciones de: Fuerza electromotriz, potenciales y sobrepotenciales. Aunque todas se expresen en voltios, representando una misma cantidad, no son la misma cosa según el efecto que describen.
- Compatibilidad con los modelos de la librería eléctrica estándar de MODELICA.
- Mejora de la estabilidad y velocidad del modelo.

Los resultados no se deben tomar como un absoluto, sino que lo importante es que el modelo sea adecuado. El resto puede ser trabajo de ajustar los parámetros para obtener una respuesta lo más ajustada a los resultados de la pila que deseemos modelar.

El modelo sin duda puede seguir evolucionando en el ámbito del modelado del cátodo, de la depuración del modelo y de la representación de alguna de sus variables, pero ahora tenemos un buen punto de partida con el que trabajar.

No obstante en los siguientes capítulos se nos van a presentar líneas de trabajo que mejoran y complementan al modelo, incluyendo nuevos fenómenos a modelar. Concretamente se va a tratar el tema del modelado térmico y el modelado anódico.

Otras líneas de trabajo futuras pueden ser el modelado de los colectores y su disipación de calor, o el modelado de una pila multicelular conocida como stack.

También sería muy interesante hacer análisis de tipo Fourier de la pila, para poder ver la evolución de sus características en función de la frecuencia de la corriente que circula.

Por último es necesario comprobar la relación que tienen algunos de los parámetros entre sí, un posible ejemplo es la relación que debe haber entre la fracción de electrolito y la fracción (porosidad) de poros y la carga de agua.

## 3

## Análisis mediante modelado térmico

### 3.1. Introducción

En este nuevo capítulo se incorporan nuevas ecuaciones al modelo, además de algunas correcciones y modificaciones.

Los principales cambios se centran en tres ejes principalmente:

En primer lugar se revisa el potencial de la pila o también denominado potencial de Nernst, en función de la temperatura y otros parámetros inherentes a la reacción electroquímica del agua. En el modelo anterior dicho potencial tenía un valor fijo.

En segundo lugar se revisa la conductividad protónica en función de la hidratación de los volúmenes de control que describen al NAFION. Dicha conductividad va a depender de la temperatura de modo directo, pero también de modo indirecto puesto que la hidratación de la membrana y la catalítica dependen de la temperatura.

Ya por último se aborda el balance térmico a través de los principales mecanismos involucrados, a saber: Generación térmica, conducción y convección térmica, y transición de estado del agua.

El modelo se encuentra ubicado en la librería "celula\_pem\_2", también transcrita en el [anexo A](#). Esta librería es específica para este capítulo, y además de los modelos que componen la pila, contiene los casos de análisis de este tercer capítulo en la sublibrería "ejercicios".

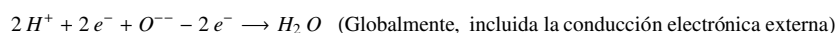
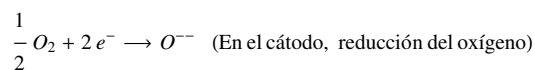
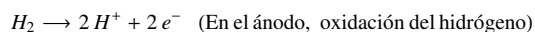
### 3.2. Modelado matemático

#### 3.2.1. Reacción electroquímica y potencial de Nernst

La reacción química que acontece en la pila se puede representar de varias maneras, pero en este trabajo se emplea la siguiente:



Esta reacción ocurre en varias etapas y localizaciones.



Por lo tanto por cada mol de agua, se generan dos moles de electrones. Éstos se relacionan con la corriente eléctrica a través de la constante de Faraday, siendo 1mol de electrones equivalente a 96485 (C).

Es importante señalar que aunque la reacción se produce en varias etapas, el producto final (agua) se crea exclusivamente en el cátodo debido a que el hidrógeno (ionizado como protones) puede cruzar la membrana mientras que por el contrario el oxígeno no.

También es muy importante decir que toda la reacción está catalizada, puesto que de lo contrario las moléculas de gas no se disocian tan fácilmente y la reacción apenas se produciría.

Esta reacción tiene una serie de propiedades, que por comentar algunas podemos empezar por su cinética. Se supone que la reacción (3.1) se lleva a cabo en ambos sentidos a una velocidad dependiente de las concentraciones de los productos de cada lado de la reacción. En el equilibrio la velocidad en ambos sentidos es la misma y las concentraciones, o en este caso las presiones, están relacionadas por una constante denominada  $K_p$

$$K_p = \frac{[H_2 O]_p}{[H_2]_p [O_2]_p^{1/2}} \quad (\text{los subíndices indican que se trata de presiones}) \quad (3.2)$$

$$K_c = K_p (RT)^{1/2} \quad (\text{concretamente para esta reacción})$$

En la fórmula (3.2) se deben incluir tan sólo las especies que estén presentes en forma gaseosa, con lo que su forma final puede variar. Por ejemplo el agua se puede formar en forma líquida o vapor, además el hidrógeno está presente diluido en el agua acidificada por la membrana. Por todo eso la forma final que puede adoptar (3.2) no está clara.

Es de señalar que estas fórmulas indican las concentraciones o presiones en el equilibrio, pero no el tiempo que tardan en llegar a dicho equilibrio. Como los resultados de estas ecuaciones no son demasiado precisos y como el equilibrio podría llevar tiempos enormes o infinitos, cual es el caso, la aplicación de dichas fórmulas para el modelo no es práctica. Por ende el sobrepotencial de concentración de oxígeno quedará como se definió en el capítulo 2, y no en función de  $K_p$  tal y como se sugiere en [6].

De igual modo, tampoco se corrige la energía libre de Gibbs mediante el valor de  $K_p$  y la fórmula siguiente.

$$\Delta G = RT \text{Log}[K_p] \quad (3.3)$$

Para exponer el planteamiento energético de la reacción, se van a aclarar dos conceptos importantes:

- La entalpía de reacción es la energía de un sistema disponible para intercambio en cualquiera de sus formas, como trabajo, como calor, como cambios en la organización de las moléculas...
- La entropía es la parte de la energía que no puede emplearse para producir trabajo o calor. Por lo que se entiende que esta parte energética se emplea en cambios de organización molecular.
- La energía libre es la parte que se puede emplear para realizar un trabajo, eléctrico en este caso, pero también puede convertirse en calor. Esta energía es tomada como referencia para conocer si una reacción será o no espontánea. Aún así, que una reacción sea espontánea no significa que se produzca a una velocidad aceptable, por ejemplo: Podemos juntar los gases hidrógeno y oxígeno en un mismo volumen y la reacción pese a ser espontánea y exotérmica apenas se producirá a no ser que se aplique una energía (o también un catalizador) que inicie la reacción. Además la reacción inversa apenas se producirá pese a lo que indique  $K_p$ . Por eso es importante para este trabajo el no empleo de  $K_p$  en el modelo. Además las reacciones en la práctica no suelen constituir procesos reversibles.

Para averiguar el potencial de Nernst hay que partir de una de las definiciones de entalpía.

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S \quad (3.4)$$

Si buscamos los valores de la entalpía de reacción de (3.1), nos encontramos con que el agua puede estar en un estado final líquido o gas, con sus valores de entalpía correspondientes para dicha reacción.

$$\Delta H_{\text{liq}} = -285\,830 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right); \quad \Delta H_{\text{gas}} = -241\,818 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right) \quad \text{calculado a } 298 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

Despejando la energía libre en (3.4)

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (3.5)$$

Se conocen las entalpías; lo siguiente entonces es cómo deducir las entropías. En el anexo B se muestra la deducción de los valores de la entropía del agua en función de la temperatura y el cambio de estado. Eso sirve para corregir la entropía del agua.

Para calcular la entropía de reacción, se toman los valores de las entropías de cada uno de los componentes y se resta a la entropía de los productos, la de los reactivos.

$$\Delta S_{\text{reacción}} = \Delta S_{\text{productos}} - \Delta S_{\text{reactivos}}$$

En la sección 2.2.5. está la tabla con los valores de las entropías de los componentes de esta reacción, dado por supuesto que se han calculado a una temperatura igual a 298(°K).

$$\Delta S_{\text{liq}} = 70 \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right) - 131 \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right) - \frac{205}{2} \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right) = -163.5 \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right)$$

$$\Delta S_{\text{gas}} = (70 + 121) \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right) - 131 \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right) - \frac{205}{2} \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right) = -42.5 \left( \frac{J}{^\circ\text{K mol}} \right)$$

Ahora son conocidos todos los elementos de la ecuación (3.5). Al tener en cuenta que con la reacción tal y como está escrita, con un mol de hidrógeno se generan 2 moles de electrones, el trabajo (eléctrico) realizado por esta reacción dado por la energía libre es:

$$\Delta G = QV = -2F\varepsilon \implies \varepsilon = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (3.6)$$

Es el potencial de Nernst o fuerza electromotriz de la pila. Según (3.6) si dividimos (3.5) entre  $-2F$  tenemos el potencial de Nernst.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta H}{2F} + \frac{T \Delta S}{2F} \quad (3.7)$$

Los datos de las entalpías están calculados a 298(°K), de ese modo y empleando (3.5) se pueden calcular las energías libres a esa temperatura.

$$\Delta G_{\text{liq}} = -285\,830 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right) + \left( 298 \text{ (°K)} \right) 163.5 \left( \frac{J}{\text{°K mol}} \right) = 237\,107 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right)$$

$$\Delta G_{\text{gas}} = -241\,818 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right) + \left( 298 \text{ (°K)} \right) 42.5 \left( \frac{J}{\text{°K mol}} \right) = 229\,153 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right)$$

Para este trabajo se emplea la forma gaseosa del agua, a resultas de lo cual la expresión aproximada con la que se puede calcular el potencial de Nernst es la siguiente.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta H}{2F} + \frac{T \Delta S}{2F} = \frac{241\,818 \left( \frac{J}{\text{mol}} \right)}{2 \times 96\,485 \left( \frac{C}{\text{mol}} \right)} - \left( \frac{42.5 \left( \frac{J}{\text{°K mol}} \right)}{2 \times 96\,485 \left( \frac{C}{\text{mol}} \right)} \right) T$$

$$\varepsilon = 1.253 \text{ (V)} - (2.202 \cdot 10^{-4}) T \quad (3.8)$$

Con esta expresión se calcula el potencial de Nernst aproximado de la pila a cualquier temperatura, con la aproximación de que la entropía de reacción apenas varía con la temperatura. En el cómputo final del potencial de pila, a este potencial hay que restarle las pérdidas de activación, ohmicas y de concentración.

En lo referente a estas últimas, hay que recordar que la expresión para calcularlas se queda tal y como se definieron en el capítulo 2, en lugar de ponerlo en función de  $K_p$  como sugiere [6].

Por último se analizará la reacción desde el punto de vista de Le Chatelier, para predecir los cambios en el comportamiento de la reacción ante cambios en algunos parámetros.

Un aumento de la temperatura desplazará la reacción hacia la izquierda que es el sentido endotérmico de la reacción, para compensar el aumento de temperatura absorbiendo calor. En la práctica este desplazamiento será despreciable en los rangos de temperatura en los que nos moveremos, y por el contrario la velocidad de la reacción se verá favorecida en mayor medida que penalizada por la constante de equilibrio.

Un aumento de la presión de oxígeno desplaza la reacción hacia la derecha que es el sentido en el que se disminuye la presión de este gas, al haber menos moles de productos que de reactivos. Entonces una disminución en la presión del oxígeno penaliza desplazando hacia la izquierda la reacción y con ello el potencial de pila. Esto se refleja en el modelo mediante el sobrepotencial de concentración, pero como ha sido comentado, sin emplear la constante de equilibrio sino una fórmula empírica descrita en el capítulo anterior, véase 1.2.3.

El mismo resultado se aplica para la presión del hidrógeno o del vapor de agua, salvo por el hecho de que en el modelo se supone que éste se va a presentar en forma diluida en agua, e implica que la constante de equilibrio  $K_p$  no lo tiene en cuenta. Se puede sin embargo tener en cuenta mediante la constante  $K_c$ , pero no va a ser el caso.

Un aumento de la presión de vapor de agua favorece la reacción, claro que también el encharcamiento del cátodo. En la práctica se debe tener en cuenta que el principio de Le Chatelier es orientativo, no informa de la cantidad en la que se desplaza la reacción ni de su velocidad. Además esta reacción va a estar catalizada, por lo que la velocidad de la reacción directa dependerá del catalizador, mientras que la reacción inversa apenas se producirá en un tiempo finito.

### 3.2.2. Conducción eléctrica

El fenómeno de la conducción eléctrica se compone de dos fenómenos. Por un lado está la conducción electrónica, que no va a diferir con lo ya dicho en la subsección 2.2.3. Por otro lado está la conducción protónica, descrita a continuación.

El material del que está compuesta la membrana y suponemos que parte de la capa catalítica es el NAFION. Se trata de un derivado del ácido trifílico polimerizado. Con eso, una membrana hidratada se convierte en una solución ácida, con una destacable concentración de iones hidronio. Por lo tanto, se trata de un material que presenta una característica ácida cuando está debidamente hidratado.

Aunque el ánodo no se modela en este capítulo, en dicho ánodo y mediante un catalizador, las moléculas de gas hidrógeno se disocian y oxidan. Eso las convierte en protones, pero lo cierto es que no permanecen en dicha forma. Al estar hidratado, los protones formarán parte de iones hidronio  $H_3O^+$  oxidados. Estos iones se moverán en el agua del ánodo y alcanzarán la membrana. Tal y como se ha explicado, la membrana otorga un carácter ácido al agua, con lo que los iones hidronio provenientes del ánodo y ubicados ahora en la membrana se moverán con relativa soltura no sólo a través del agua, sino a través de la estructura misma del NAFION.

El resultado es una buena conductividad protónica de dicho material, siempre que la membrana se encuentre convenientemente hidratada. Cabe pensar que el nivel de hidratación del NAFION influye en la conductividad protónica y con ello en el sobrepotencial óhmico protónico. Así parece en efecto suceder, tal como se comenta en [6], y además en dicho texto se ofrece una fórmula empírica que nos da la conductividad protónica en función de la hidratación.

$$K_p = b_1 e^{\left[ b_2 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3.9)$$

$$b_1 = b_{11} \lambda_m - b_{12} \quad (3.10)$$

$$\lambda_m = 0.043 + 17.81 \alpha - 39.85 \alpha^2 + 36 \alpha^3 \quad (3.11)$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{H}_2\text{Og}}}{P_{\text{satH}_2\text{O}}} \quad (3.12)$$

$$b_2 = 1268 \text{ (}^\circ\text{K)}; b_{11} = 0.5139 \left( \frac{1}{\Omega m} \right); b_{12} = 0.3260 \left( \frac{1}{\Omega m} \right)$$

$\alpha$  se refiere a la humedad relativa, y  $\lambda$  es una variable que varía (no linealmente) desde 0 a 14 cuando la humedad relativa varía desde 0% al 100%

Esta variación de la conductividad protónica se incluye ahora en el modelo, pero en lo que se refiere a la conductividad electrónica, se deja con la forma descrita en el capítulo 2.

Aparte de lo arriba mencionado, existe otra novedad asociada a la conductividad protónica: El flujo electroosmótico. Se trata de una corriente de agua asociada al flujo de los iones hidronio, y por tanto de los protones.

El planteamiento de dicho flujo es el siguiente: Cada molécula de hidronio está rodeada (solvatada) por otras cuatro moléculas de agua normales, lo cual añadido a la propia molécula de hidronio, hace un total de cinco moléculas de agua por cada protón transportado.

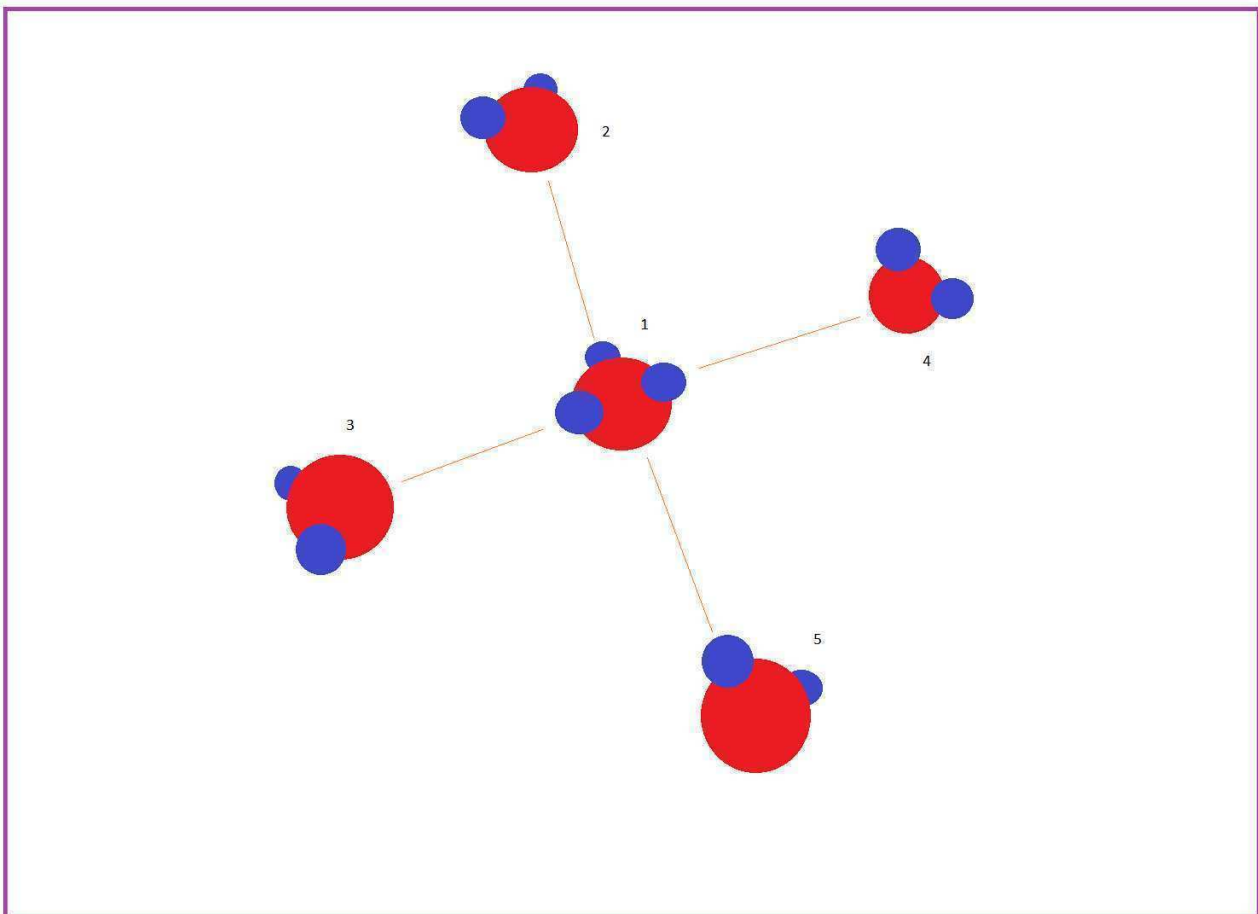


Figura 40 Solvatación del hidronio

Teniendo eso en cuenta y que un mol de protones equivale a 96485(C), es fácil convertir la corriente eléctrica protónica en flujo neto molar de la corriente electroosmótica.

$$F_{12eo} = \frac{5 I_p}{F} \quad (3.13)$$

Esta es la magnitud del flujo electroosmótico, por supuesto en el mismo sentido que el flujo protónico.

### 3.2.3. Balance térmico

Los principales fenómenos que participan en el balance térmico son: La conducción, la convección, la generación y la transición de estado del agua.

En cuanto a la conducción, se describe mediante la ecuación de conducción del calor

$$\nabla^2 T = \frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ésta se promedia a lo largo del espacio para obtener entre otros resultados la ley de Fourier. Ésta dice que el calor que atraviesa una superficie  $S$  durante un instante  $dt$  es igual a:

$$dQ = -K \frac{\partial T}{\partial x} S dt \quad (3.14)$$

Todo esto está ampliamente explicado en [3]. Lo siguiente es discretizar (3.14) para adaptarlo al modelo. El resultado es que el calor que circula como flujo térmico a través de un modelo de transporte es igual a:

$$F_{\text{cond}} = \frac{\partial Q}{\partial t} \approx -K S \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.15)$$

- En cuanto a la convección, en algunos textos se afirma el papel refrigerante que pueden tomar para la pila algunas de las especies involucradas, al ser introducidas en la pila a una temperatura inferior a la de ésta. Por lo tanto se va a incluir este efecto en el modelo y se analiza así su posible influencia. En este trabajo se tiene sólo en cuenta la convección del agua líquida y vapor.

Supongamos un pequeño volumen a temperatura  $T_{\text{in}}$  y con calor específico  $C_{\text{pin}}$ ; en él entra una pequeña cantidad de sustancia con calor específico  $C_{\text{pex}}$  y temperatura  $T_{\text{ex}}$ . La conservación de la energía implica que la energía que gana el volumen es igual a la energía que pierde la sustancia.

$$-dQ_{\text{ex}} = -C_{\text{pex}} dM_{\text{ex}}(T_{\text{in}} - T_{\text{ex}}) = dQ_{\text{in}}$$

Dividiendo ahora entre diferencial de  $t$  se obtiene el flujo por convección.

$$F_{\text{conv}} = \frac{\partial Q_{\text{in}}}{\partial t} = C_{\text{pex}} \frac{\partial M_{\text{ex}}}{\partial t} (T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}) = C_{\text{pex}} F_m (T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}) \quad (3.16)$$

$F_m$  hace referencia al flujo másico de la sustancia convectiva que entra en el volumen. Para ser precisos, en (3.16) donde pone  $T_{\text{in}}$  lo exacto es que se debería poner la temperatura de mezcla, dada por la siguiente expresión que se puede encontrar deducida dentro del [anexo B](#).

$$T_f = \frac{C_{\text{pin}} M_{\text{in}} T_{\text{in}} + C_{\text{pex}} F_m \Delta t T_{\text{ex}}}{C_{\text{pex}} F_m \Delta t + C_{\text{pin}} M_{\text{in}}}$$

En la práctica no será necesario emplear la expresión suprascrita, considerando que la masa en el volumen es mucho mayor que la pequeña cantidad de sustancia entrante por unidad de tiempo.

Sólo queda adaptar (3.16) al modelo de transporte donde conocemos las temperaturas en sus extremos:  $T_1$  y  $T_2$ . Hay que recurrir a la descripción mediante eventos del fenómeno de la convección, puesto que depende del sentido del flujo másico de las especies implicadas.

$$F_{\text{conv1}} = \begin{cases} C_p F_{12 \text{H}_2\text{O}l} M_{\text{H}_2\text{O}}(T_1 - T_2) \forall F_{12 \text{H}_2\text{O}l} \geq 0 \\ C_p F_{12 \text{H}_2\text{O}l} M_{\text{H}_2\text{O}}(T_2 - T_1) \forall F_{12 \text{H}_2\text{O}l} < 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

$$F_{\text{conv2}} = \begin{cases} C_p F_{12 \text{H}_2\text{O}g} M_{\text{H}_2\text{O}}(T_1 - T_2) \forall F_{12 \text{H}_2\text{O}g} \geq 0 \\ C_p F_{12 \text{H}_2\text{O}g} M_{\text{H}_2\text{O}}(T_2 - T_1) \forall F_{12 \text{H}_2\text{O}g} < 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

$$F_{\text{conv}} = F_{\text{conv1}} + F_{\text{conv2}} \quad (3.19)$$

Apréciase que el flujo másico es igual al producto del flujo molar neto por la masa molar del agua. Además hay dos flujos convectivos puesto que hay dos especies convectivas, concretamente el agua en estado líquido y vapor.

- En cuanto a la generación térmica, ésta se desdobra en dos componentes. Por un lado está la generación de las corrientes eléctricas por efecto Joule, y por otro está la generación térmica de la propia reacción química.

Las generaciones térmicas por efecto Joule se calculan en el modelo de transporte, siendo conocidas sus expresiones.

$$G_p = I_p SP_p \quad (3.20)$$

$$G_e = I_e SP_e \quad (3.21)$$

$SP$  hace referencia al sobrepotencial ohmico tanto protónico como electrónico. Se aplica la expresión correspondiente a la especie involucrada, ya sea una o ambas. Este calor generado se transmite a partes iguales a los dos volúmenes de control contiguos al modelo de transporte.

El otro fenómeno que genera calor es la propia reacción química a través de una de las fracciones de la energía no aprovechables. Concretamente a través del sobrepotencial de activación, siendo su expresión similar a las anteriores.

$$G_{\text{act}} = I_{\text{linea}} SP_{\text{act}} \quad (3.22)$$

Esta expresión es aplicable tan sólo en la capa catalítica, donde se produce la reacción. En definitiva, la generación térmica será la suma de ambas generaciones (cuando sea aplicable).

$$G_t = G_{act} + G_e + G_p \quad (3.23)$$

- En cuanto a la energía involucrada en la transición de estado del agua. La entalpía de vaporización o calor latente de vaporización, es a 100(°C) igual a  $40.65 \left( \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right)$ . Sin embargo su expresión en función del tiempo está dada en el texto [2] con las posteriores revisiones, siendo su forma final la siguiente.

$$L_v = 3.1192 \cdot 10^4 + 1.854018 \cdot 10^2 T - 8.05959 \cdot 10^{-1} T^2 + 1.379322 \cdot 10^{-3} T^3 - 9.9104399 \cdot 10^{-7} T^4$$

El calor generado (mejor es decir empleado puesto que será negativo), por el fenómeno de la vaporización del agua es:

$$G_v = -L_v G_{\text{H}_2\text{Og}} \quad (3.24)$$

En esta ecuación  $G_{\text{H}_2\text{Og}}$  es la generación molar neta de vapor de agua por evaporación.

- Esos son todos los elementos del balance térmico. Así afecta a la temperatura del volumen de control.

El aumento de temperatura debido a un calor  $dQ_{\text{neto}}$  es igual a

$$C_p \rho_s S_{vc} L_{vc} dT$$

Dividiendo entre la diferencial del tiempo, aparece la expresión que contempla los flujos térmicos.

$$C_p \rho_s S_{vc} L_{vc} \frac{\partial T}{\partial t} = C_p \rho_s S_{vc} L_{vc} \text{der}(T)$$

La expresión final del balance térmico es la que sigue.

$$F_{\text{cond}} + F_{\text{conv}} + G_t + G_v = C_p \rho_s S_{vc} L_{vc} \frac{\partial T}{\partial t} = C_p \rho_s S_{vc} L_{vc} \text{der}(T) \quad (3.25)$$

En el modelo se despeja  $\text{der}(T)$  en la ecuación de estado de la temperatura.

### 3.2.4. Disipación térmica

Una vez conocidos los mecanismos de transmisión del calor, queda saber hacia donde se dirigirá dicho calor. En una pila de combustible es el colector el encargado de repartir el suministro de gases, así como de drenar el agua líquida y gestionar la refrigeración. En la mayoría de la documentación sobre pilas PEM se hace mención a la temperatura óptima de trabajo, que se sitúa en torno a los 80(°C). Para que no se supere dicha temperatura, hay que refrigerar, y dicha refrigeración se lleva a cabo en el colector de la pila. Se puede refrigerar de dos maneras principales: O bien haciendo circular una corriente de aire fresco por los canales del colector, con vistas a enfriarlo y disipar calor. O también se pueden enfriar las especies involucradas para que sean ellas mismas las que enfrien la pila al penetrar en ella.

Lo cierto es que en el modelo de este segundo capítulo no están implementados los colectores, englobándose sus efectos en el modelo "terminales". Para no complicar demasiado este fenómeno de la refrigeración, y para que las implementaciones vayan siendo modulares, la disipación funcionará haciendo que el modelo terminales esté siempre a una misma temperatura, sea ésta la temperatura supuesta del refrigerante. Asimismo las especies también penetran en la pila a dicha temperatura completando el efecto refrigerante.

Contrariamente, también es empleado el efecto calefactante de dicho dispositivo. Cuando la pila comienza a funcionar, es necesario que alcance la temperatura óptima lo antes posible, de modo que lo que se hace es calentarla para que suba hasta su temperatura de trabajo. A partir de ahí se refrigera.

En definitiva, en el modelo terminales se define el parámetro "temperatura" y se da por supuesto que el refrigerante la mantiene constante. Es una idealización de la refrigeración pero que funciona razonablemente bien.

### 3.2.5. Ensamblado del modelo y valores de los parámetros

El modelo debe tener la misma forma de conexión que hasta ahora ha sido empleada. Para detalles me refiero a lo explicado en las secciones 2.2.1. y 2.2.4. salvo lo que se refiere a los parámetros.

Para simular la refrigeración, la temperatura de frontera en el modelo "terminales" ha variado, siendo ahora superior. También será superior el nivel de vapor de agua para simular los mecanismos de hidratación de la membrana.

Asimismo hay muchos parámetros nuevos, cuales pueden ser las entalpías, conductividades o los calores específicos. Hablando de estos últimos, han sido obtenidos de internet.

Estos son los valores de los parámetros en los modelos:

<b>Membrana</b>		
Ancho de la capa		$8 \cdot 10^{-5}$ (m)
Tortuosidad	$\tau$	1
Sección del medio	$S_{vc}$	1 ( $m^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O,l}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la membrana	$\rho_e$	$2000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	R	$8.31447$ ( $\frac{J}{\text{°K mol}}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ ( $m^2$ )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O,l}$	$5.5 \cdot 10^{-6}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua	$D_{H_2O,gK}$	$10^{-6}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.72
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{0,H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Ref. de temperatura de la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	0
Calor específico del NAFION	$C_p$	1047
Conductividad térmica del NAFION	$\sigma_t$	0.0586
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	4181
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	2080
Coefficiente de conductividad	$b_{11}$	0.5139
Coefficiente de conductividad	$b_{12}$	0.3260
Temperatura de ajuste	$b_2$	1268
Temperatura de ajuste	$t_2$	303

Tabla 4 Valores de los parámetros para la membrana

<b>Catalítica</b>		
Ancho de la capa		$4 \cdot 10^{-5}$ (m)
Tortuosidad	$\tau$	5
Sección del medio	$S_{vc}$	1 (m <sup>2</sup> )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O,l}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la catalítica	$\rho_e$	$4000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	R	$8.31447$ ( $\frac{J}{^\circ K mol}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ (m <sup>2</sup> )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria	$D_{O_2-H_2O,g}^{ref}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Referencia de presión para la difusión binaria (ordinaria)	$P_g^{ref}$	$10^5$ (Pa)
Referencia de temperatura para la difusión binaria (ordinaria)	$T_g^{ref}$	308.1 (°K)
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O,l}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen)	$D_{O_2,K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{H_2O,gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.2
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Referencia de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Densidad de generación electrónica del cátodo	$A_{act} I_0^{ref}$	$1.2$ ( $\frac{A}{m^2}$ )
Pendiente de Tafel	B	0.04 (V)
Referencia de presión del oxígeno en el cátodo	$P_{O_2}^0$	$10^5$ (Pa)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$1$ ( $\frac{S}{m}$ )
Potencial corrector (SP concentración)	$C_1$	1
Potencial corrector (SP concentración)	$C_3$	1
Factor corrector (SP concentración)	$C_2$	2.5
Presión de corte para el oxígeno	$P_{corte}$	65 000
Presión mínima permitida para el oxígeno	$P_{inf}$	52 000
Corrección de ganancia (SP concentración)	A	6
Entalpía de reacción, estado final gaseoso	$\Delta h$	-241 818
Entropía de reacción, estado final gaseoso	$\Delta S$	-42.5
Calor específico del NAFION	$C_p$	1047
Conductividad térmica del NAFION	$\sigma_t$	0.0586
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	4181
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	2080

Coefficiente de conductividad	$b_{11}$	0.5139
Coefficiente de conductividad	$b_{12}$	0.3260
Temperatura de ajuste	$b_2$	1268
Temperatura de ajuste	$t_2$	303

Tabla 5 Valores de los parámetros para la capa catalítica

<b>Difusora</b>		
Ancho de la capa		$1.6 \cdot 10^{-3}$ (m)
Tortuosidad	$\tau$	1
Sección del medio	$S_{vc}$	1 (m <sup>2</sup> )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O,1}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la difusora	$\rho_e$	$4000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	R	$8.31447$ ( $\frac{J}{\circ K mol}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ (m <sup>2</sup> )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria	$D_{O_2-H_2O,g}^{ref}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Referencia de presión para la difusión binaria (ordinaria)	$P_g^{ref}$	$10^5$ (Pa)
Referencia de temperatura para la difusión binaria (ordinaria)	$T_g^{ref}$	308.1 (°K)
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O,1}$	$3.5 \cdot 10^{-11}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen)	$D_{O_2,K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{H_2O,gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.6
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.4
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{0,H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Referencia de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$10^4$ ( $\frac{S}{m}$ )
Conductividad protónica del electrolito	$K_p$	$0$ ( $\frac{S}{m}$ )
Calor específico del grafito	$C_p$	711
Conductividad térmica del grafito	$\sigma_t$	1.59
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	4181
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	2080

Tabla 6 Valores de los parámetros para la difusora

<b>Terminales</b>		
Ancho de la capa		$4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Temperatura del colector	T	353 (°K)
Sección del medio	$S_{vc}$	1 (m <sup>2</sup> )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad de la capa	$\rho_e$	$4000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Presión de oxígeno	presion_o2	100 000
Presión vapor agua	presion_vapor_agua	40 000
Presión saturación agua	presion_saturacion_agua	42 590
Carga de agua líquida	carga_agua_liquida	0.01
Porosidad	$\epsilon_g$	1

Tabla 7 Valores de los parámetros para el colector

### 3.3. Análisis del modelo

#### 3.3.1. La curva de polarización en función de diversos parámetros

##### 3.3.1.1. Curva de polarización original

Acto seguido se ejecuta el modelo de este tercer capítulo con los parámetros de las tablas suprascritas, y a continuación será comentado.

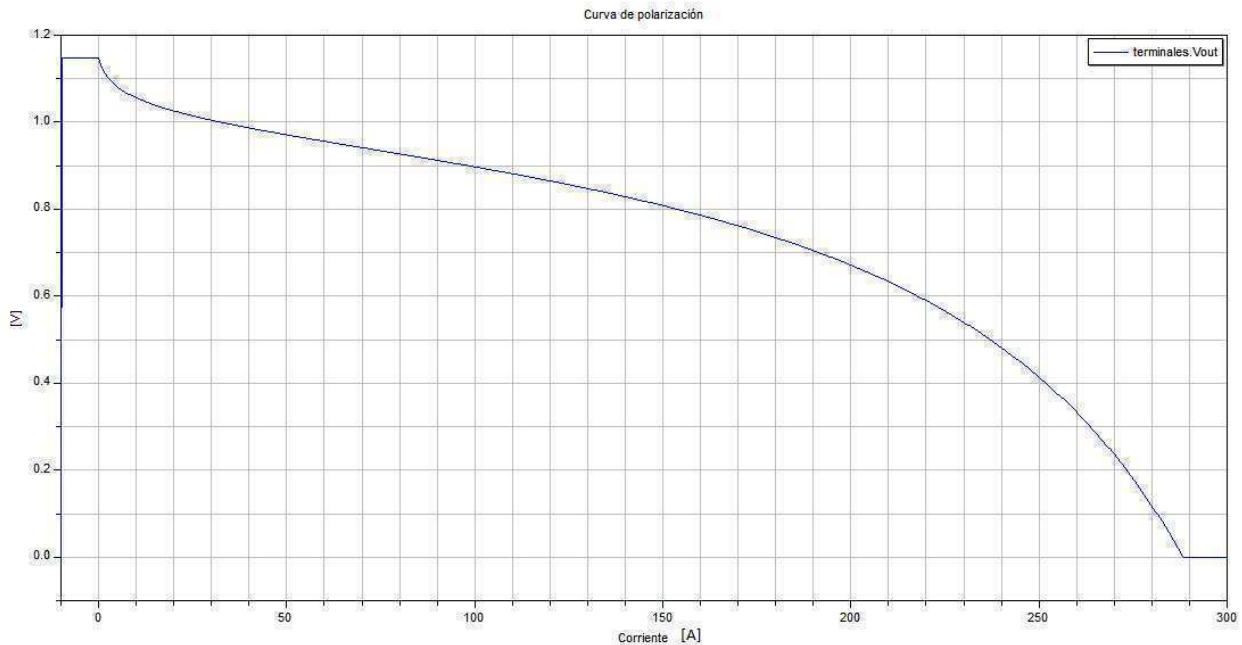


Figura 41 Curva de polarización

A la izquierda de la gráfica se aprecia la puesta en marcha de la pila, con su incremento de potencial desde cero en los primeros instantes de simulación. Además, será en esos instantes primeros en los que la pila se irá calentando desde los 25°C hasta los 80°C Sin duda el calentamiento es muy rápido, pero hay que tener en cuenta que la superficie de la pila es de un metro cuadrado y eso favorece la conducción térmica.

El modelado del colector no está completo y se basa en presentar una temperatura fija con nula resistencia térmica. Una línea de trabajo futura, es el modelado de dicho colector con los efectos térmicos pertinentes.

En definitiva se comienza calentando el modelo hasta la temperatura de trabajo, de unos 80(°C) y se deja que las presiones y humedades se estabilicen. A partir del instante  $t=0(s)$  se comienza a aplicar carga a la pila para generar la curva de polarización.

Debido a que la pila tiene unos tiempos muy cortos de asentamiento para la práctica totalidad de sus parámetros, se puede considerar que está en equilibrio en todo momento de la gráfica.

En cuanto a la gráfica y en primer lugar, lo que se aprecia es que el rango dinámico se ve mermado a menos de la mitad. Un cambio tal implica que algo importante está sucediendo ahora y en el modelo del capítulo 2 no. Para conocer al fenómeno responsable de dicha merma, se analiza la forma que tiene la polarización en escalones.

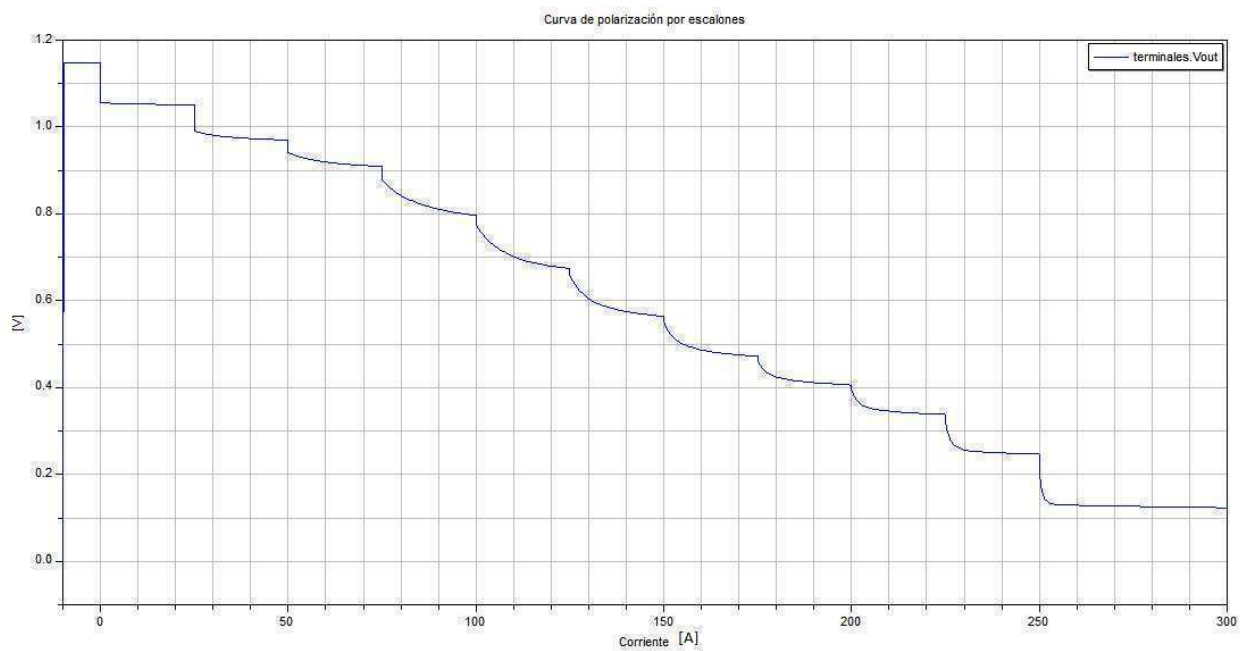


Figura 42 Polarización en escalones

Ya en el capítulo 2 se comentó el hecho de que la distorsión en la forma de los escalones está relacionada con la carga de agua. Va a ser ésta la responsable de la disminución del rango dinámico a través del sobrepotencial de concentración de oxígeno. Los volúmenes de control van ahora a estar con una mayor carga de agua, por lo tanto la superficie de contacto con el oxígeno será menor y el sobrepotencial de concentración aumenta significativamente. Si lo que se busca es apreciar dicho aumento en la carga de agua, hay que observar esta gráfica.

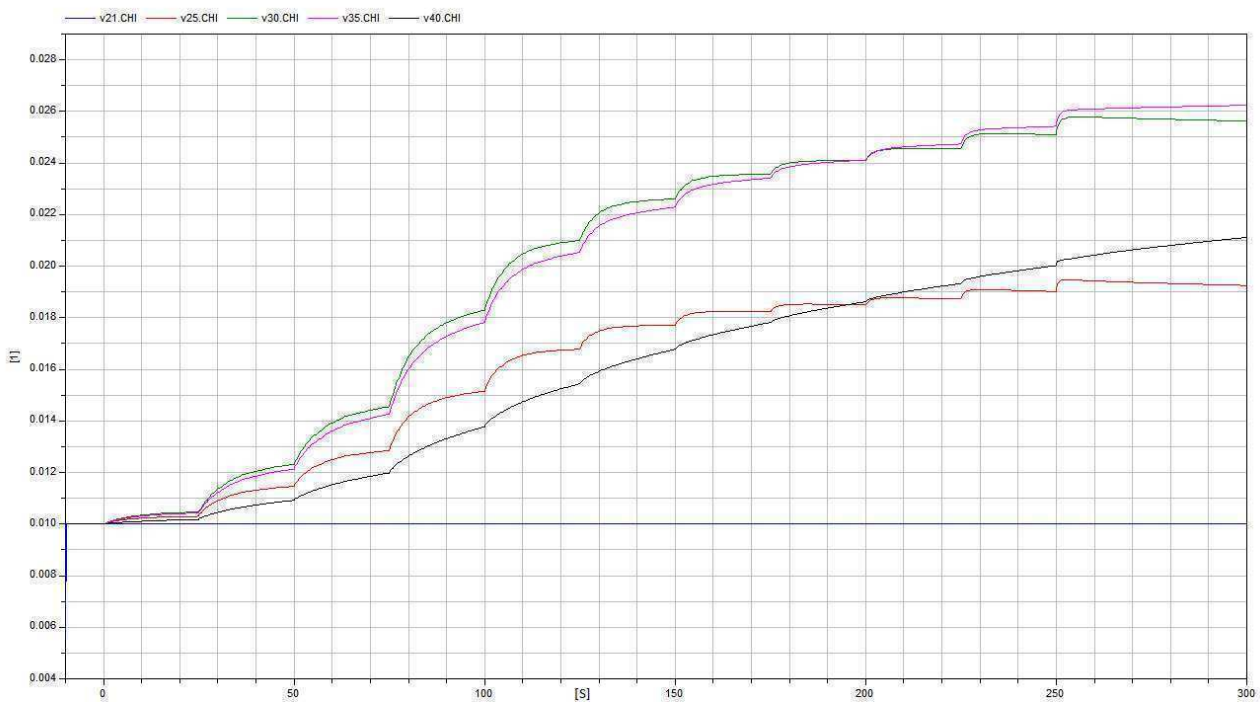


Figura 43 Carga de agua en distintos volúmenes de control de la capa catalítica

Se aprecia claramente la variación de la carga de agua, creándose un gradiente de concentración proporcional a la corriente. La responsable de este comportamiento es la corriente electrosmótica. Ésta es la que arrastra el agua líquida a lo largo de la célula y en una cantidad proporcional a la corriente que circula por ella. A resultas de eso, los volúmenes de control se llenan de agua líquida arrastrada por el efecto electrosmótico. Eso supone un menor volumen de gases y por lo tanto un incremento del sobrepotencial de concentración con respecto al modelo del capítulo 2 que no contemplaba estos efectos.

Desde luego la forma de los escalones de la figura 42 está muy distorsionada, debido a las corrientes de agua y a la variación en la carga de agua de la capa catalítica. La corriente electroosmótica llena los volúmenes de control y perjudica gravemente el rango dinámico de la pila. De entre todas las formas de aportación de agua líquida, cuales son la condensación, la difusión y la corriente electroosmótica, la primera es completamente despreciable en orden de magnitud comparada con las otras dos; las dos últimas tienen sentidos opuestos pero es de mayor magnitud la corriente electroosmótica. Ésta crea un gradiente y la difusión trata de anularlo, pero en balance hay un flujo neto en el sentido de la corriente protónica. La tercera región de la curva de polarización está muy acentuada debido precisamente al sobrepotencial de concentración.

### 3.3.1.2. Curva de potencia original

Si en la subsección anterior se ha observado la merma en el rango dinámico, no es de extrañar que en la curva de potencia se refleje una pérdida de potencia.

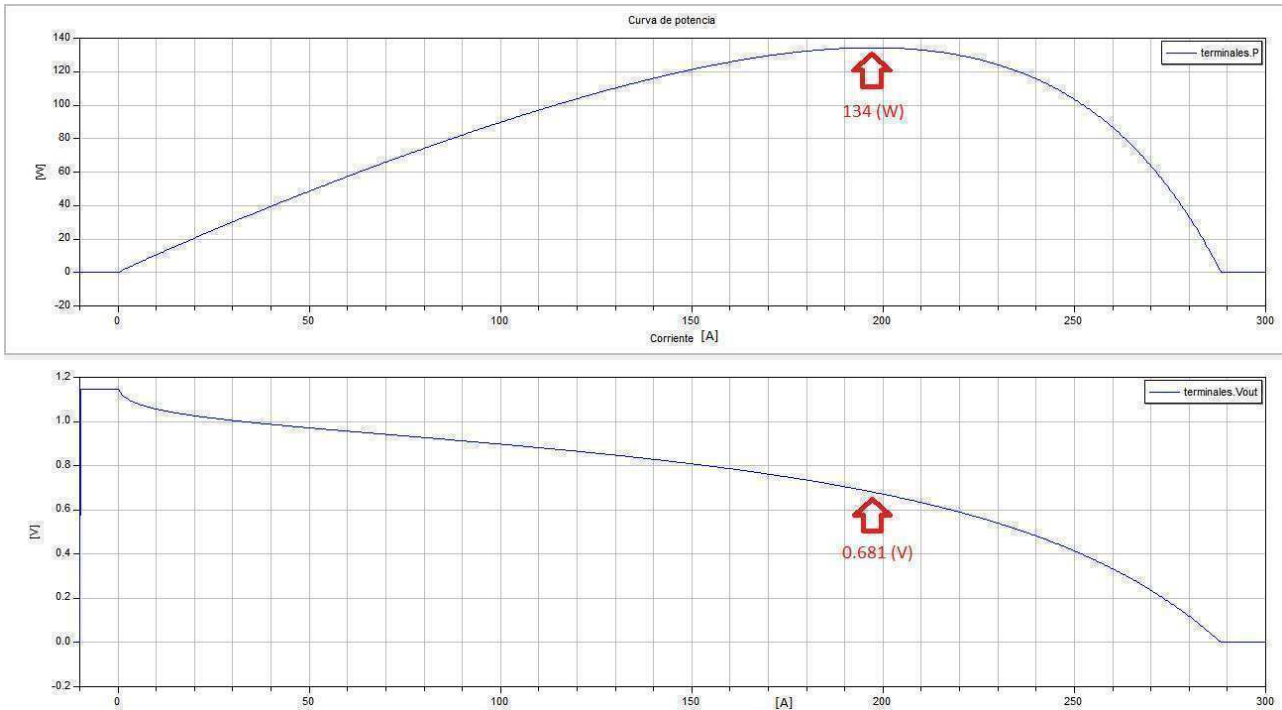


Figura 44 Curva de potencia

El punto de potencia máxima se encuentra en los 0.681(V) y se corresponde con 134(W). Al compararlo con los 0.51(V) y 245(W) que el modelo del capítulo 2 tenía, se comprueba la pérdida de la nada despreciable cantidad de 111(W). El principal causante de esa pérdida no es algún efecto térmico, sino el encharcamiento debido al efecto electroosmótico. Más adelante se comprobará que la influencia de los fenómenos térmicos en la curva de polarización es mucho menor.

### 3.3.1.3. Variación en función de la hidratación a través de la conductividad protónica

El concepto "hidratación" hace referencia a una variable denominada  $\lambda_m$  y definida en [6], que varía de cero hasta catorce cuando la humedad relativa varía de forma no lineal desde cero hasta el cien por ciento en el siguiente modo.

$$\lambda_m = 0.043 + 17.81 \alpha - 39.85 \alpha^2 + 36 \alpha^3$$

Todo esto ha sido ya introducido en las ecuaciones (3.9) a (3.12), y sirve para describir cómo varía la conductividad protónica con la hidratación, y por ende, con la presión de vapor de agua.

Esa misma definición, considera que el mecanismo de hidratación de la membrana es un dispositivo que introduce vapor de agua en los colectores junto con los gases hidrógeno y oxígeno. Los colectores están representados por el modelo "terminales", y el mecanismo de la hidratación por el parámetro "presión de vapor de agua".

También hay una carga de agua líquida en el modelo terminales que aportará un nivel adecuado de agua líquida a la membrana para con ello favorecer la conducción protónica en el NAFION. Este agua líquida se transmite hacia o desde los volúmenes de control por difusión o arrastre electroosmótico. El contenido de agua líquida no debe ser excesivo puesto que penaliza mediante el sobrepotencial de concentración, pero tampoco debe ser muy bajo puesto que el arrastre electroosmótico podría secar las celdas y penalizar entonces mediante el sobrepotencial protónico. Una posible forma de modelar este efecto de reducción del potencial de pila debido a que no haya agua líquida suficiente para cumplir con el arrastre electroosmótico, sería incluir un nuevo sobrepotencial electroosmótico en el modelo de los colectores y en los que contienen NAFION, para modelar dicho efecto. Esa sería otra posible línea de trabajo en el futuro, de momento se supondrá que siempre va a haber agua líquida suficiente para cumplir con la corriente electroosmótica. Por todo eso, en esta prueba se varía tan sólo la presión de vapor de agua y con ello la conductividad protónica.

En cuanto a la ecuación (3.10), debido a su forma existe un valor mínimo para la hidratación, en el cual, la conductividad protónica se anula. Dicho valor se obtiene igualando a cero y despejando  $\lambda$  en (3.10).

$$\lambda_m = \frac{0.3260}{0.5139} = 0.634$$

Sustituyendo este valor en (3.11) y despejando  $\alpha$  por métodos numéricos, resulta que se corresponde con un valor de humedad relativa de

$$\alpha = 0.0360 \rightarrow \alpha = 3.6 \% \text{ de humedad relativa como valor mínimo.}$$

Por debajo de este valor la membrana sencillamente no conduce. La principal disminución en la tensión de salida por este efecto se produce cuando la presión de vapor en los terminales cae por debajo de los 5000(Pa), lo que equivale a que la humedad relativa caiga por debajo del 12%. Eso deja mucho margen práctico de trabajo con pilas reales, puesto que se podrían permitir variaciones muy notables en el mecanismo de hidratación sin que la tensión de salida fuese afectada de manera importante. No hay que olvidar tampoco, que el nivel de agua líquida debe también tener unos límites inferiores, pero ese tema de momento no está modelado completamente, lo que en definitiva supone que es importante mantener la humedad relativa lo bastante alta para que haya vapor y agua líquida de aportación para la membrana. Como el sentido de la corriente electroosmótica y la corriente protónica coinciden, se dará el caso de que la aportación de agua líquida se dará por el ánodo; por el contrario, el cátodo será el lugar donde se drene toda esa circulación de agua tanto generada como arrastrada.

Veamos los resultados de variar la hidratación en el modelo terminales y por igual en ambos extremos, variándolo mediante el mecanismo consistente en modificar la humedad relativa de los gases de alimentación.

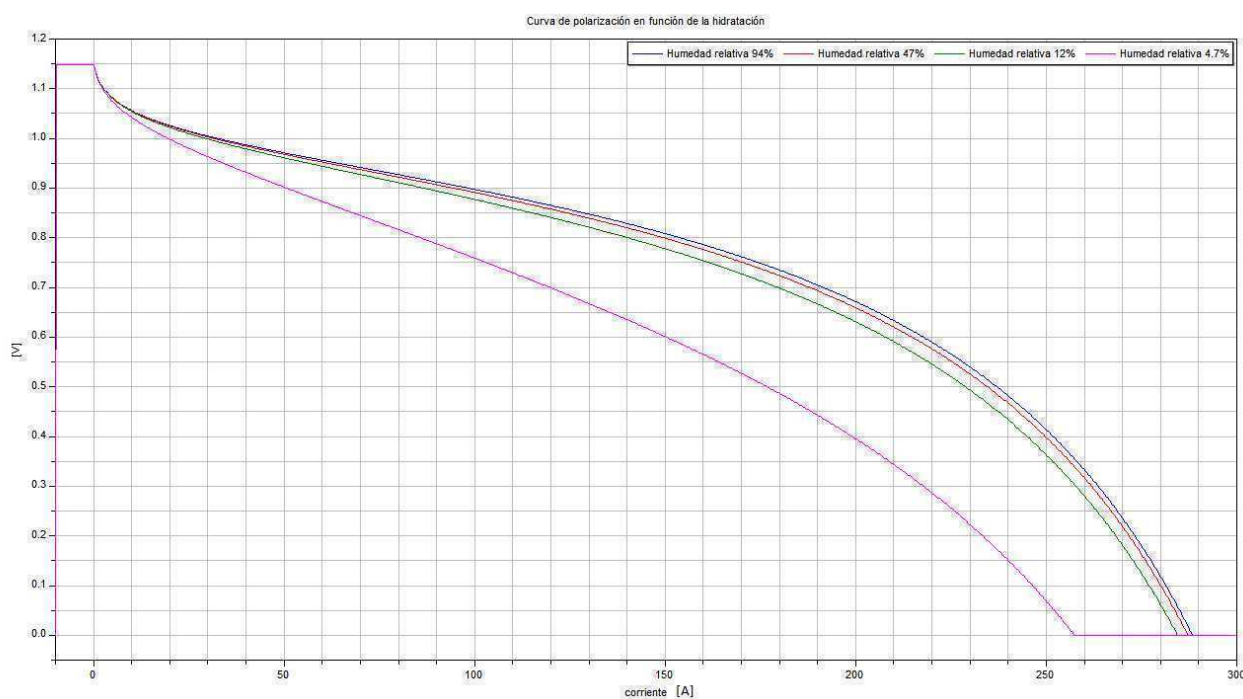


Figura 45 Polarización en función de la hidratación

Se aprecia claramente lo antes explicado, por debajo del 12% de humedad relativa la caída en el potencial es bastante importante, y puede incluso llegar a inutilizar la pila. De ahí la importancia de los mecanismos de hidratación, que son críticos pero que sin embargo dejan bastante margen de maniobra.

Como conclusión, la influencia de este parámetro es desde luego muy importante en el comportamiento de la pila y son apreciables sus efectos en la segunda región, o región ohmica.

#### 3.3.1.4. Variación en función de la temperatura de disipación

En la implementación en el modelo de la disipación térmica, se parte de la hipótesis de que algún fluido refrigerante circula por los colectores haciendo que estos se mantengan a una temperatura constante. Ésto, se trata de una simplificación del fenómeno refrigerante, quedando como línea de trabajo futuro el modelado completo de los colectores.

Es menester señalar un defecto que tiene el modelo de este capítulo y que está ligado a la temperatura. Las ecuaciones (2.9) y (2.10) que dan la variación de la presión de saturación del vapor de agua en función de la temperatura, no se corresponden fielmente con los datos reales, al menos en lo referente a altas temperaturas entre los 80(°C) y los 100(°C). Una prueba de ello es que a cien grados centígrados, la presión debería ser de 101300(Pa) que se corresponde con la presión atmosférica y por lo tanto con el fenómeno de la ebullición. Los valores que las fórmulas señaladas ofrecen en ese rango de temperaturas son sensiblemente inferiores a lo que deberían ser. No se van a ajustar dichas ecuaciones en este trabajo, pero queda también pendiente el ajuste de dichas ecuaciones antes mencionadas. La precisión que tienen va a ser suficiente para los fines de este trabajo.

Los resultados de variar la temperatura de disipación son estos.

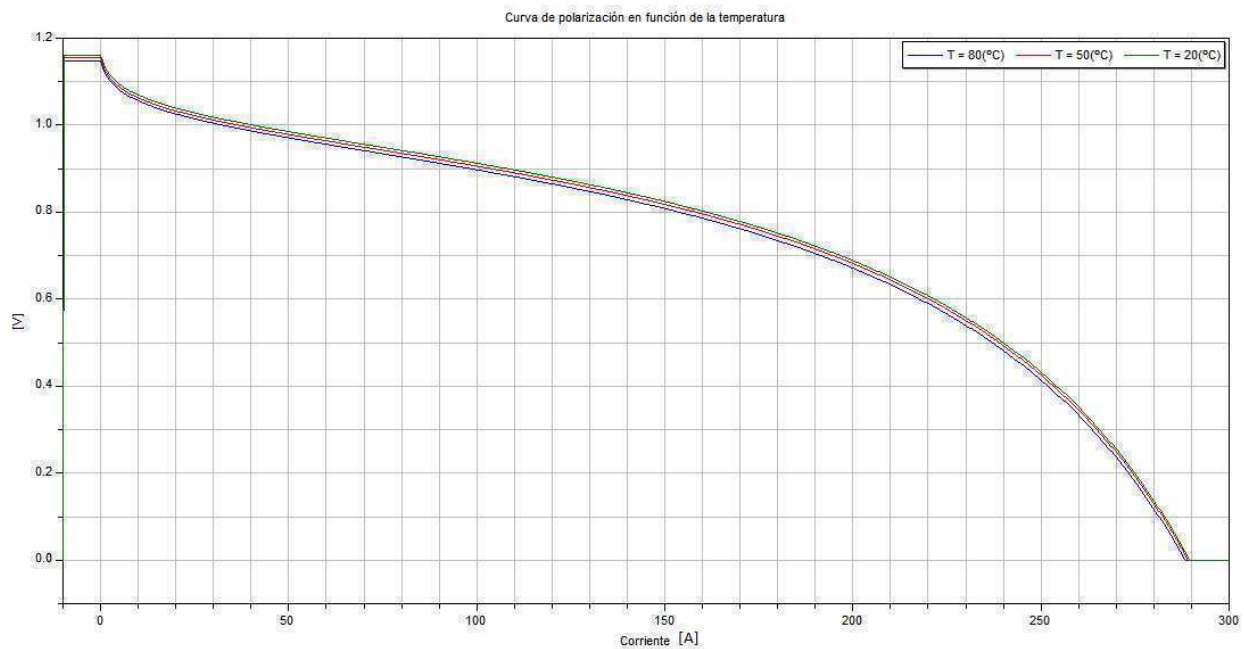


Figura 46 Curva de polarización en función de la temperatura de disipación en los colectores

Para poder explicar lo que sucede se deben considerar dos efectos contrarios. En primer lugar, la conducción protónica mejora con la temperatura según (3.9), lo que redundaría en una mejora del potencial. En segundo lugar, el potencial de Nernst según (3.8) se ve mermado, lo que implica una merma en el potencial.

El tercer fenómeno que se vería implicado es la evaporación del agua líquida, pero su influencia será pequeña comparada con los dos efectos anteriores. La transición de estado es cuatro o cinco órdenes de magnitud menor que la difusión o el arrastre electrosmótico, incluso con variaciones notables de los niveles de hidratación y carga de agua. Su influencia se puede desde luego ajustar mediante los parámetros de superficie y velocidad de condensación.

Ya por último, los fenómenos de la conducción y la convección son dependientes de la temperatura, pero resultará que la pila tal y como está definida, enseguida adquiere una temperatura uniforme casi igual a la temperatura de disipación. Además el tiempo de asentamiento del fenómeno térmico es de unos segundos. La gran superficie de conducción unida a la pequeña longitud de la pila hacen que la pila adquiera rápidamente dicha temperatura.

Haciendo un balance de todos los fenómenos que dependen de la temperatura, son los dos primeros (conducción protónica y potencial de Nernst) los más afectados, pero el que lo hace en mayor medida es el segundo. La influencia de la temperatura en el potencial de Nernst disminuye dicho potencial en un orden de magnitud superior a los otros efectos, que por el contrario pasan inadvertidos.

En un caso real, un generador estaría compuesto por numerosas pilas individuales en contacto mutuo y que por lo tanto la temperatura de unas dependería de la de las otras y del fenómeno disipativo. En esas condiciones seguramente encontraríamos un gradiente importante de temperatura a lo largo de todo el generador, pero eso es una línea de trabajo futura. Ahora se toma en consideración solamente una célula galvánica, por lo que el gradiente de temperatura se limita al gradiente en sus capas interiores y desde luego es muy pequeño. Además se ha hecho la hipótesis de una refrigeración muy potente que mantiene constante la temperatura del colector.

Como resumen cabe decir que la influencia de este parámetro es muy moderada y se manifiesta en las tres regiones. Eso deja mucho margen de maniobra en la temperatura de funcionamiento del generador, pero siempre manteniéndose por debajo de los 100(°C), puesto que superarlos provocaría la evaporación del agua líquida, de no ser que mantuviésemos la pila presurizada con una presión mayor que la atmosférica. Una evaporación tal no permitiría la conducción protónica de forma correcta y afectaría notablemente y negativamente en el funcionamiento.

Sólo falta decir que la temperatura de trabajo se centra en los 80(°C) porque de esa manera mejora el efecto de los catalizadores al disociar las moléculas de gas. Esa temperatura es un compromiso de funcionamiento, donde por un lado se necesita la pila hidratada a baja temperatura, y por otro, la alta temperatura mejora la disociación de las moléculas.

### 3.3.1.5. Variación en función de la conductividad térmica

La conductividad térmica puede hacer que aparezca un gradiente térmico en el interior de la célula, al no ser ésta capaz de disipar todo el calor generado hacia el exterior. Sin embargo la disipación es más que suficiente y el gradiente será pequeño, resultando que la influencia de la temperatura con los elementos que hasta ahora han sido considerados y modelados, es apenas perceptible, por lo menos en el rango de temperatura en que se mueven las simulaciones.

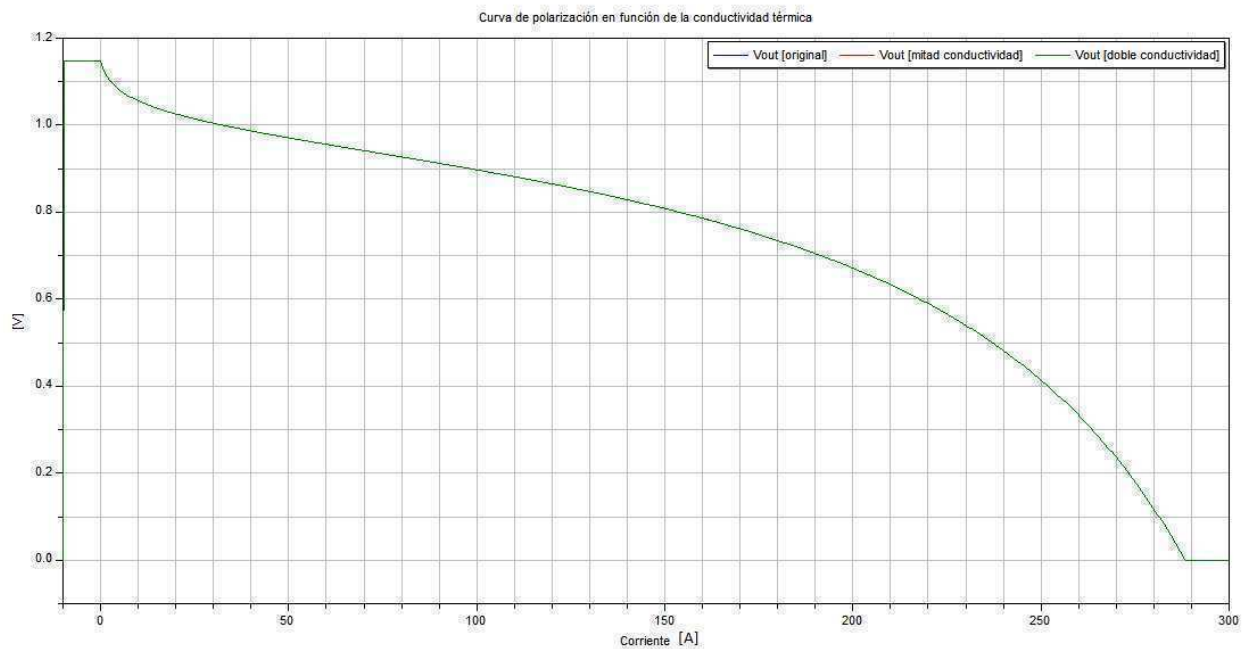


Figura 47 Curva de polarización en función de la conductividad térmica de las capas respecto a sus valores originales detallados en las tablas 4-7

La influencia es tan pequeña que las tres gráficas se confunden. De hecho es muy pequeña la magnitud del gradiente de temperatura.

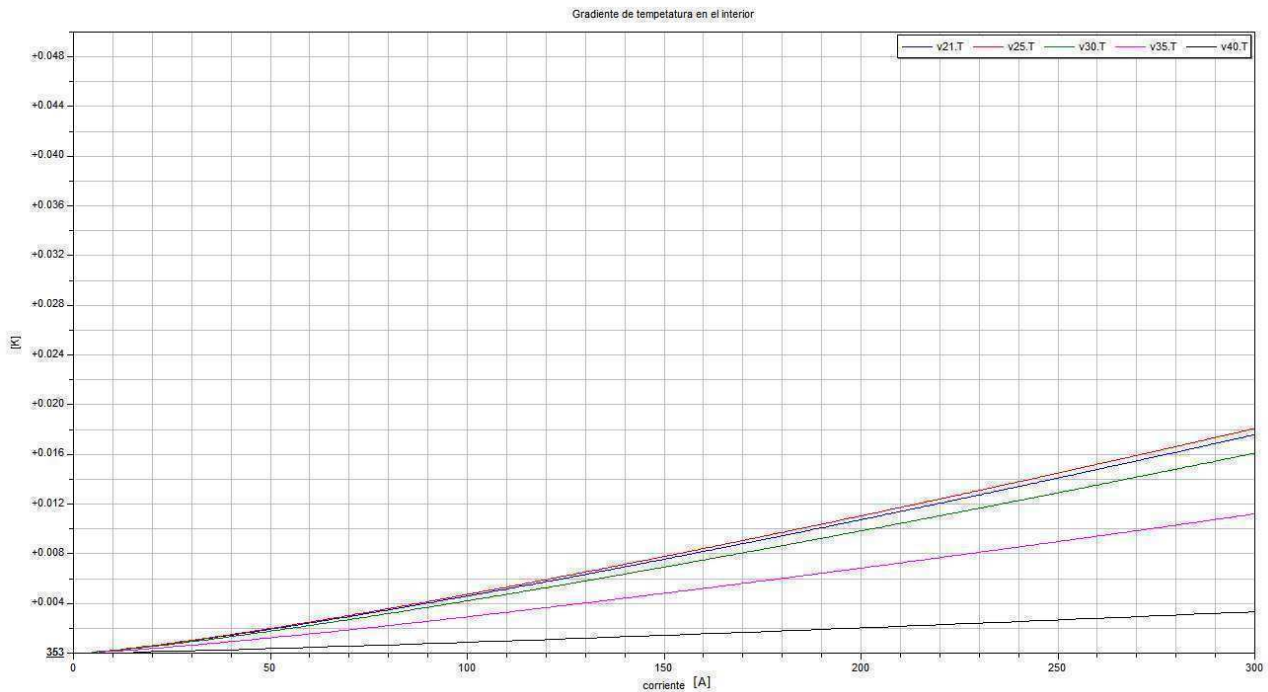


Figura 48 Gradiente de temperatura en el interior de la capa catalítica, mostrado como la evolución de las temperaturas de diversos volúmenes de control

A máxima corriente el máximo gradiente térmico no supera las dos centésimas de grado a lo largo de la capa catalítica. Eso significa una disipación térmica por conducción muy buena, lo que en definitiva descarta este parámetro como factor importante de diseño en la pila. Lo que sí se apreciará cuando esté modelado, es que en una agrupación de células galvánicas conformando un generador se podrá apreciar tanto un gradiente como una acumulación de calor por la potencia generada en conjunto. Esa potencia no es poca puesto que una sola célula es capaz de entregar más de 130(W) eléctricos, generando un calor de hasta casi 70(W).

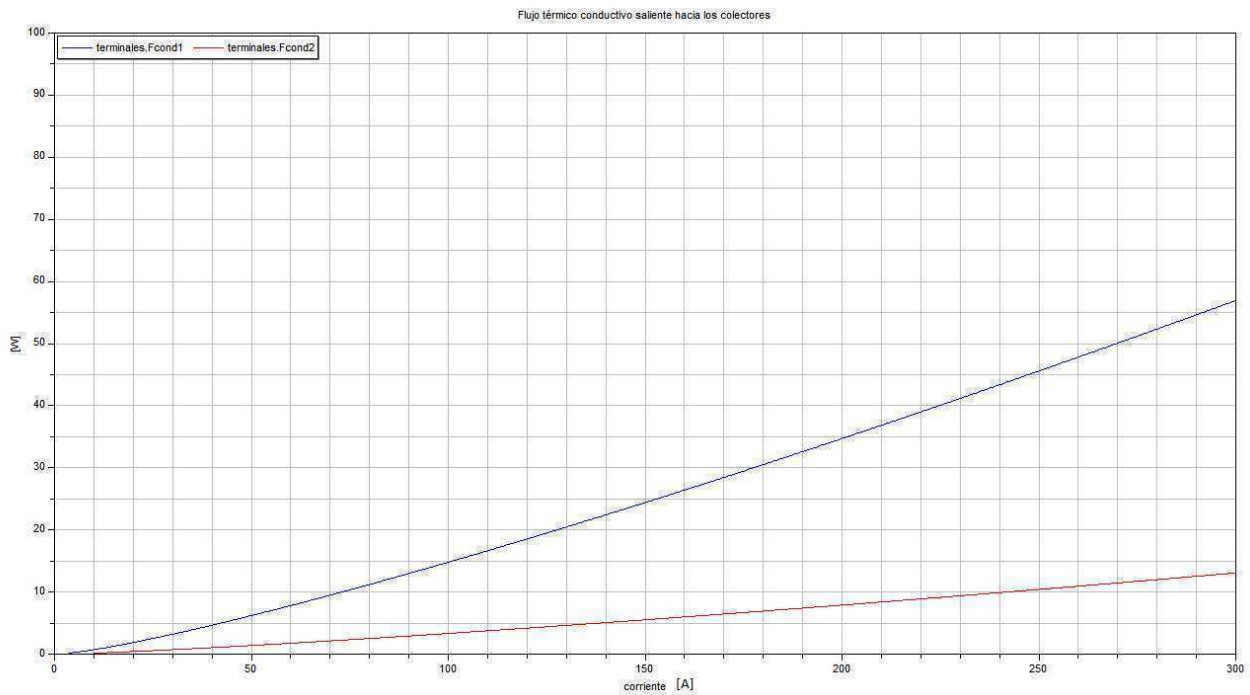


Figura 49 Flujo térmico conductivo entregado a los colectores

Lo que sí se aprecia es que se disipa más calor por el colector del cátodo (azul) que por el del ánodo (rojo), eso es debido a la mejor conductividad térmica del grafito de la capa difusora.

### 3.3.1.6. Variación en función del calor específico

Si el anterior parámetro apenas tuvo influencia sobre la curva de polarización, éste tampoco la tendrá. Pensando en qué medida puede afectar el calor específico de los materiales y mirando las ecuaciones (3.25) del balance térmico, se espera que el calor específico afecte a la dinámica de la temperatura. También se ha visto visto que dicha dinámica es muy rápida, por lo que aún cambiando considerablemente este parámetro, apenas se aprecian cambios en las propiedades macroscópicas de la pila. De hecho en la siguiente gráfica se aprecia que variar dicho parámetro no cambia la curva de polarización.

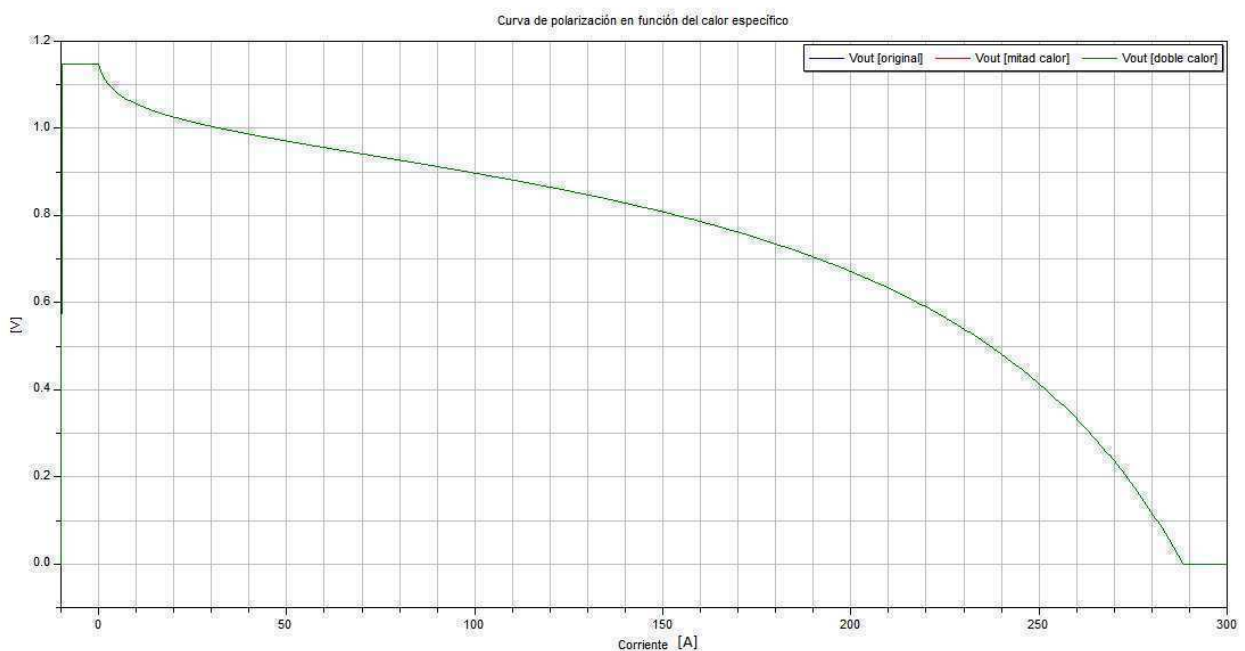


Figura 50 Curva de polarización en función del calor específico

La conclusión es que no será éste un parámetro de diseño determinante y su influencia es escasa.

### 3.3.2. El defecto de masa en función de diversos parámetros

#### 3.3.2.1. Defecto de masa original

En este capítulo se analiza el defecto de masa tanto de la presión absoluta de oxígeno como de la presión ponderada.

$$P_{xO_2} = (1 - \chi_{rel}) P_{O_2}$$

La presión ponderada o reducida, tiene por finalidad modelar el hecho de que en un volumen de control cuanto más líquido haya menos oxígeno habrá, aunque éste tenga una buena presión. El hidrógeno circula disuelto en el agua líquida como protones, mientras que el oxígeno es un gas. El oxígeno se tendrá que disolver en el agua para completar la reacción, pero primero tiene que llegar a la capa catalítica. Los casos extremos serían una pila totalmente encharcada donde no podría haber circulación de oxígeno, o bien una pila sin agua líquida donde la circulación del oxígeno sería la mejor posible.

Esa es la razón de que se modele una presión ponderada, expresar el hecho de que en una pila encharcada no puede haber demasiado oxígeno, por ende el sobrepotencial de concentración deberá aumentar. También por eso se va a representar el defecto de masa no sólo como la variación de la presión absoluta del oxígeno, sino también de la ponderada.

En la siguiente gráfica, se representa el defecto de masa de la pila en las condiciones por defecto.

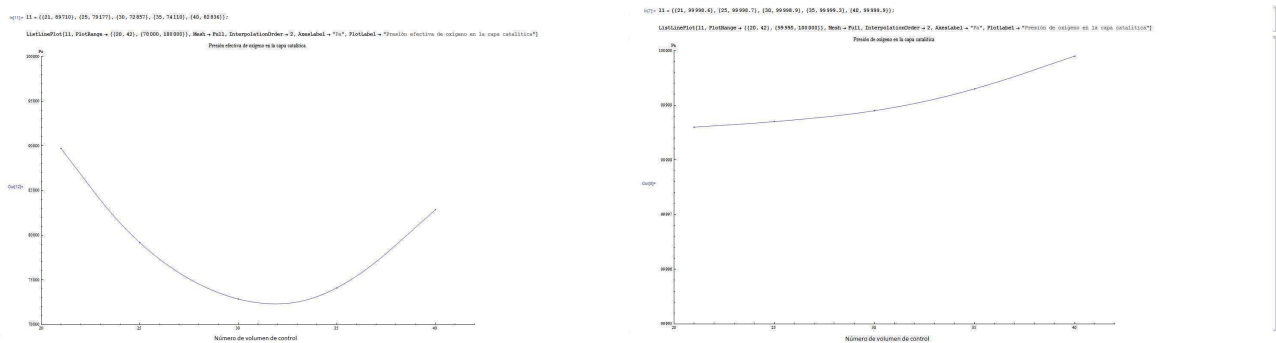
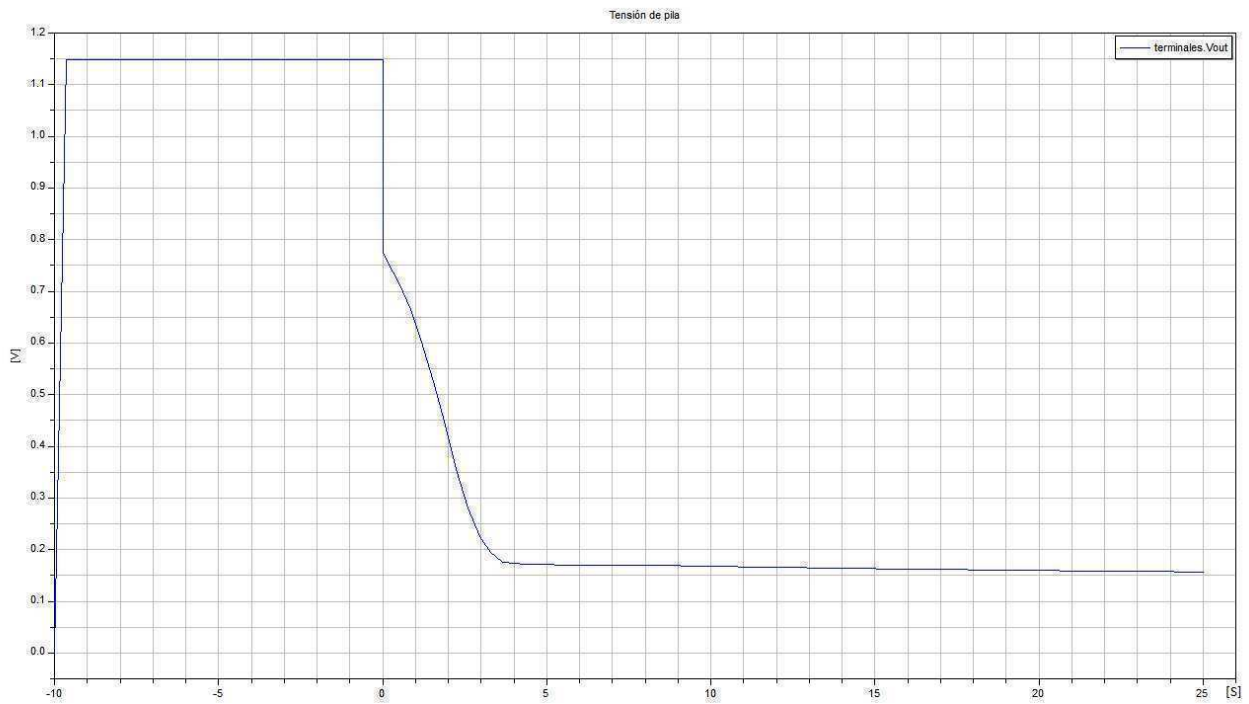


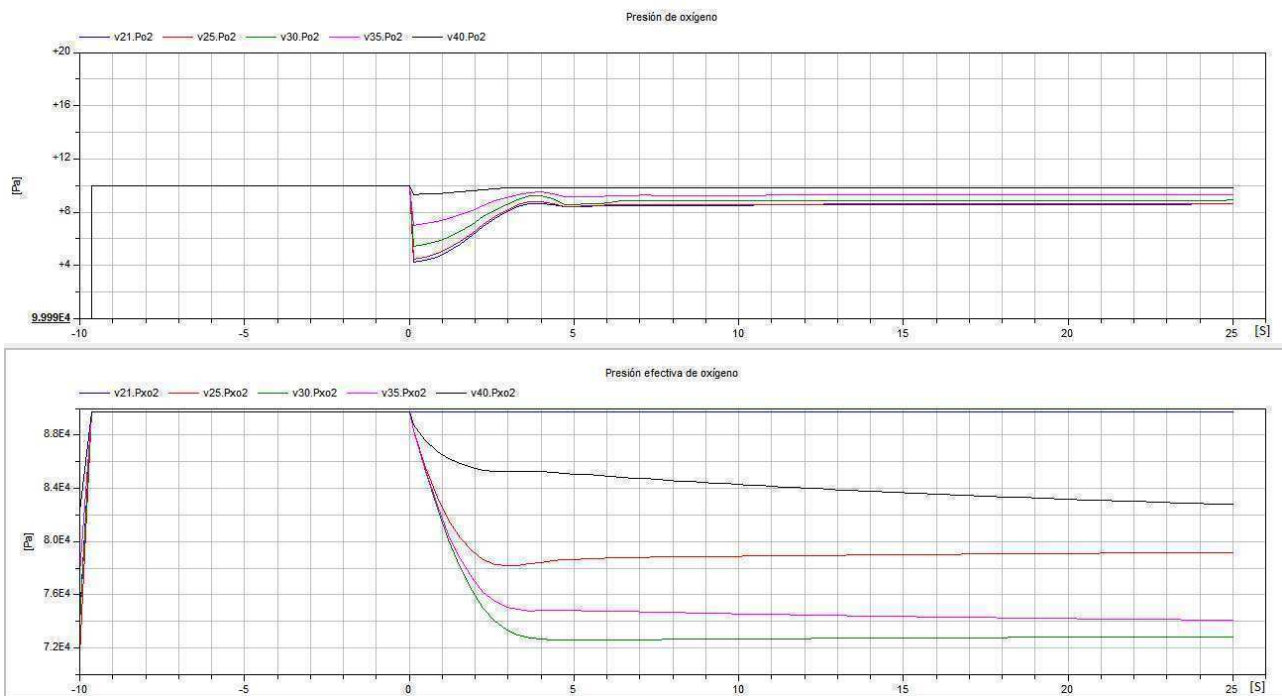
Figura 51 El defecto de masa

Es necesario aclarar el método y condiciones en las que se obtienen esos datos.

Se trata de una simulación de 25(S) en la que se conecta una resistencia que hace pasar una corriente de unos 315(A) y el potencial cae hasta casi los 0.2(V). En esas condiciones de sobrecarga y tras el asentamiento es cuando se toman los datos. Acto seguido se muestran los transitorios de la tensión de la pila a lo largo de dicha simulación.



En el momento en que se conecta la carga, se produce la evolución en las presiones y la carga de agua y durante algunos segundos dominan los transitorios para por fin alcanzar un estado de equilibrio.



Se comprueba que el defecto de masa, si tan sólo se considera la presión absoluta, es muy pequeño; con la presión ponderada se puede ver el efecto del encharcamiento, haciendo disminuir la cantidad de oxígeno en los volúmenes de control y con ello aumentando el sobrepotencial de concentración.

El agua de la catalítica proveniente de la membrana se acumula especialmente en los volúmenes de control interiores, mientras que los cercanos a la capa difusora drenan dicho agua, y como resultado de todo eso y teniendo en cuenta que la presión absoluta de oxígeno apenas varía, tenemos que la zona central de la catalítica es la más penalizada por esta presión ponderada y por lo tanto por el sobrepotencial de concentración.

Por cierto que se trata de una pila con una dinámica bastante rápida, puesto que se aprecia que los transitorios duran menos de unos cuatro segundos.

La conclusión es que el defecto de masa en términos absolutos es tan poco importante como lo era en el modelo del capítulo anterior, pero si se contempla el defecto de masa con la presión ponderada la cosa cambia. La importancia de dicho efecto es tal que hace perder más de cien vatios de PPM con respecto al modelo del capítulo anterior, además de la reducción del rango dinámico. Todo es debido sobre todo al encharcamiento que produce la corriente electroosmótica. Como en este subapartado se trata de analizar tan sólo el defecto de masa, en ese aspecto no es relevante. Tan sólo si consideramos el defecto ponderado se notan y mucho los resultados. Con posterioridad se analiza el encharcamiento de forma más exclusiva, aunque en el defecto de masa ponderado se refleje también el encharcamiento.

### 3.3.2.2. Defecto de masa en función de la hidratación

Aquí y en adelante se analizan el defecto de masa absoluto y el ponderado. Para esta prueba se hacen tres simulaciones con una humedad relativa en el modelo terminal de 94%, 47% y 12% (azul, rojo, mostaza).

Se espera que las variaciones en la humedad tengan que ver con variaciones (aunque ligeras) en el nivel de agua líquida. Eso por un lado dificulta la difusión del oxígeno y por otro penaliza en el defecto de masa ponderado.

Los resultados de aplicar dichos niveles de humedad a la pila han sido los siguientes.

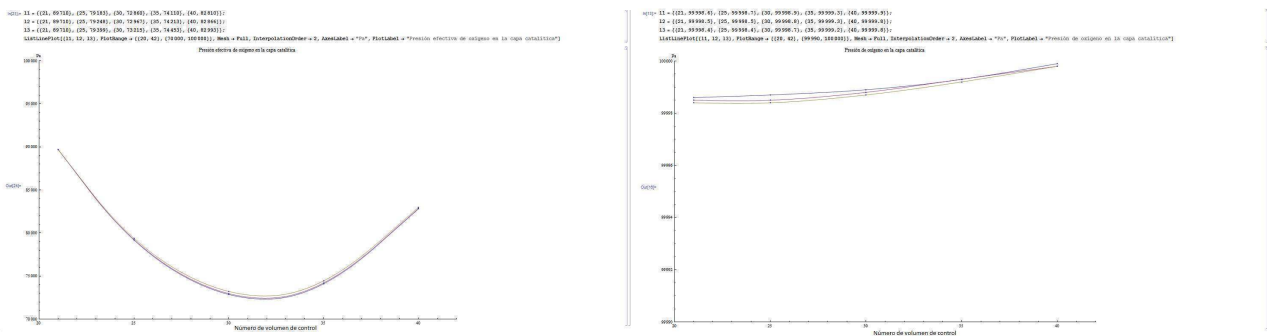


Figura 54 Defecto de masa en función de la humedad relativa

Las variaciones son bastante pequeñas y se resumen en dos puntos.

En lo que se refiere al defecto de masa absoluto, éste aumenta al disminuir la presión de vapor de agua debido a los cambios a la baja en el coeficiente de difusión binario en las ecuaciones (2.3) y (2.5).

En lo referente al defecto de masa ponderado, éste disminuye al disminuir la presión de vapor de agua debido a que al bajar la presión de vapor de agua la pila se seca, eso supone que se pierde agua líquida por evaporación y por lo tanto al haber menos agua, el defecto de masa ponderado es menor.

En conclusión, la influencia de este parámetro en el funcionamiento de la pila es pequeña o muy pequeña, debido a que la importancia de la transición de estado del agua es varios órdenes de magnitud menor que la difusión de agua líquida o vapor, y la corriente electroosmótica. Éste es un parámetro que no será crítico en el diseño.

### 3.3.2.3. Defecto de masa en función de la temperatura de disipación

La temperatura afecta a los siguientes efectos:

1. Hace aumentar la evaporación del agua.
2. Tiende a aumentar la presión o disminuir la densidad de los gases a través de la ecuación de estado.
3. Disminuye el potencial de Nernst.
4. Mejora la conductividad protónica y empeora sutilmente la electrónica.
5. Mejora ligeramente la difusión de los gases a través de las capas.
6. Indirectamente puede disminuir el flujo electroosmótico al disminuir la corriente (ver 3.3.1.4.)

En la subsección indicada en 6. se comprueba que el compendio de todos los efectos tiene por resultado una ligera merma del potencial de pila en sus tres regiones. Por lo tanto lo que cabe esperar es que un aumento de la temperatura mejore (disminuya) muy ligeramente el defecto de masa absoluto, y que mejore (disminuya) también pero en mayor medida el defecto de masa ponderado.

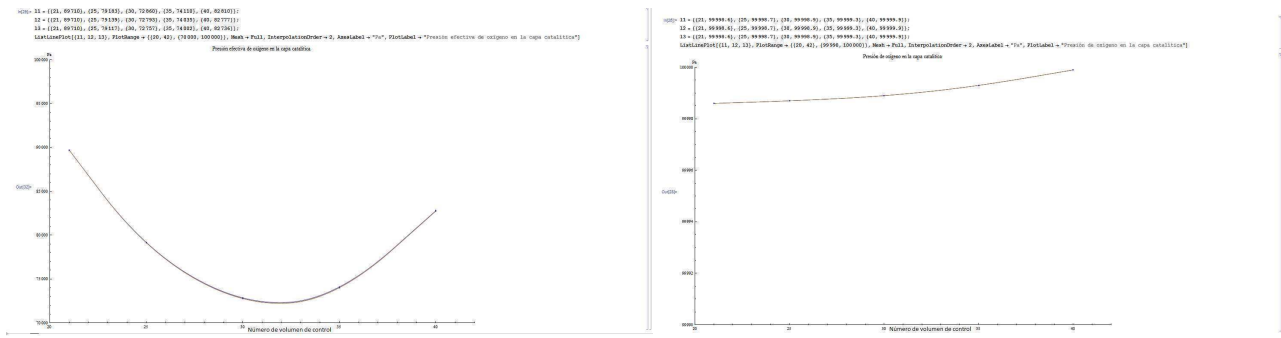


Figura 55 Defecto de masa en función de la temperatura de disipación

El cambio en el defecto de masa es tan pequeño que no se aprecia, se puede decir que no existe. Sin embargo en el defecto de masa ponderado, aunque apenas se aprecia, la gráfica azul (T=80°C) está por encima de la roja y la mostaza (T=50°C y T=20°C); por lo tanto el defecto de masa ponderado mejora sutilmente con la temperatura.

Desde luego estas variaciones son muy pequeñas y en conclusión se puede decir que no afectan sustancialmente al defecto de masa. Es evidente que al acercarse a los 100°C el agua tenderá a evaporarse rápidamente hasta llegar a ebullición. Aunque las variaciones en el defecto de masa sean pequeñas o incluso aunque las variaciones en el potencial tampoco sean excesivas, sin duda no se puede dejar que la pila PEM se acerque a los 100°C, pues se secarían la membrana y la catalítica.

Hay un fallo en el modelado de la presión de vapor de agua, con lo que la precisión a medida que sube la temperatura es menor.

La conclusión es que es admisible un rango bastante amplio de temperatura, pero que cuando ésta asciende por encima de la temperatura óptima de 80°C, se debe gradualmente ir incrementando el efecto refrigerante para que la temperatura no pase de los 90°C. A partir de esta frontera supondría una zona peligrosa.

**3.3.2.4. Defecto de masa en función de la conductividad térmica**

Si en la subsección anterior se pudo ver que los resultados de la pila varían poco con la temperatura, siempre dentro de los márgenes de seguridad, en ésta lo que cabe esperar es prácticamente lo mismo.

La conductividad térmica debería afectar tan sólo a la duración de los transitorios pero no a los valores del estado estacionario. Eso es lo que se cumplirá, puesto que se obtienen variaciones de algunos segundos en los transitorios y no se aprecian variaciones de los valores del estado estacionario.

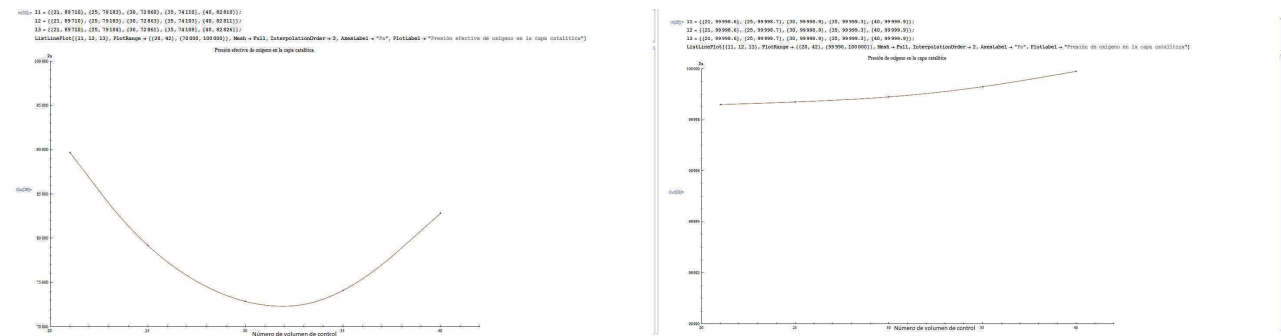


Figura 56 Defecto de masa en función de la conductividad térmica

Los resultados y la conclusión aseguran que las curvas de defecto de masa en estado estacionario son las mismas y que sólo han cambiado las duraciones de los transitorios, aunque sólo algunos segundos.

**3.3.2.5. Defecto de masa en función del calor específico**

Finaliza esta sección con un parámetro que coincide en resultados con la subsección anterior. Nuevamente se ve afectada la duración de los transitorios pero no su valor en estado estacionario tal y como ahora se muestra.

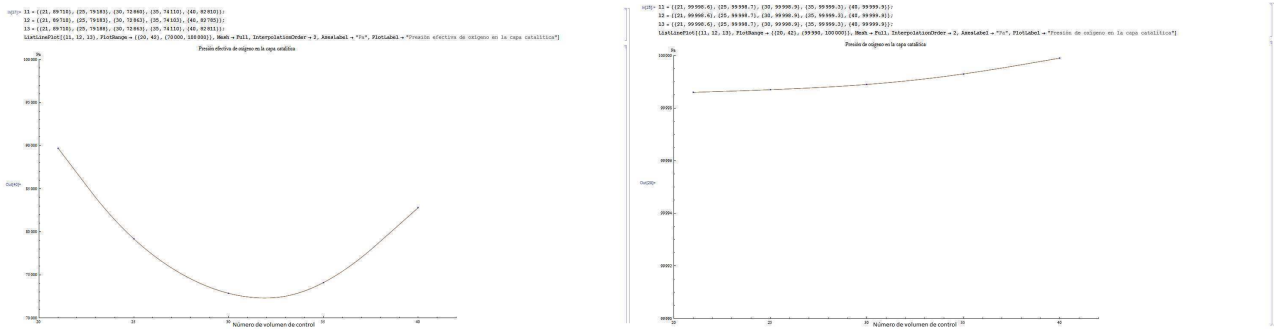


Figura 57 Defecto de masa en función del calor específico de los materiales

Aplicanse los mismos resultados y conclusiones que en la subsección anterior.

### 3.3.3. Encharcamiento en función de diversos parámetros

#### 3.3.3.1. Encharcamiento original

El encharcamiento en este modelo del capítulo 3 es mayor que en el modelo del capítulo 2. Es necesario saber en qué medida y porqué se produce el encharcamiento. Es importante puesto que el agua líquida reduce la capacidad de la pila de producir electricidad, pero por el contrario el agua líquida y vapor son necesarias para mantener hidratadas la catalítica y la membrana, asegurando así la conductividad protonica.

En las dos siguientes gráficas se representará la variación en la carga de agua relativa  $\chi_{rel}$  a lo largo de las capas de la catalítica y en función del tiempo. El tipo de simulación es el mismo que el de las figuras 42 y 43, donde se aplica un modelo de polarización por escalones, conectando a la pila una carga que varía en escalones: "resistencia\_polarizacion".

En la mitad superior de la figura 58 están los volúmenes de control en los que la carga de agua es creciente, mientras que en la mitad inferior están los volúmenes de control en los que la carga de agua decrece.

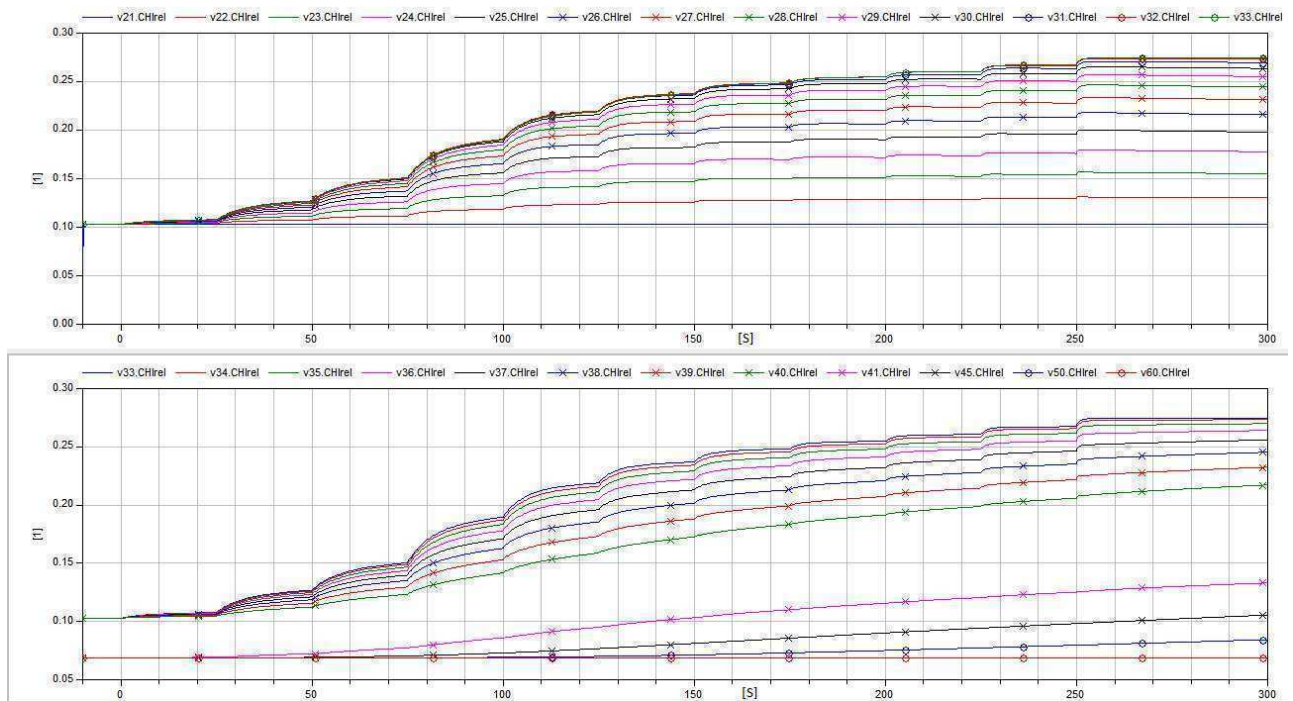


Figura 58 Carga de agua relativa, a lo largo de la capa catalítica

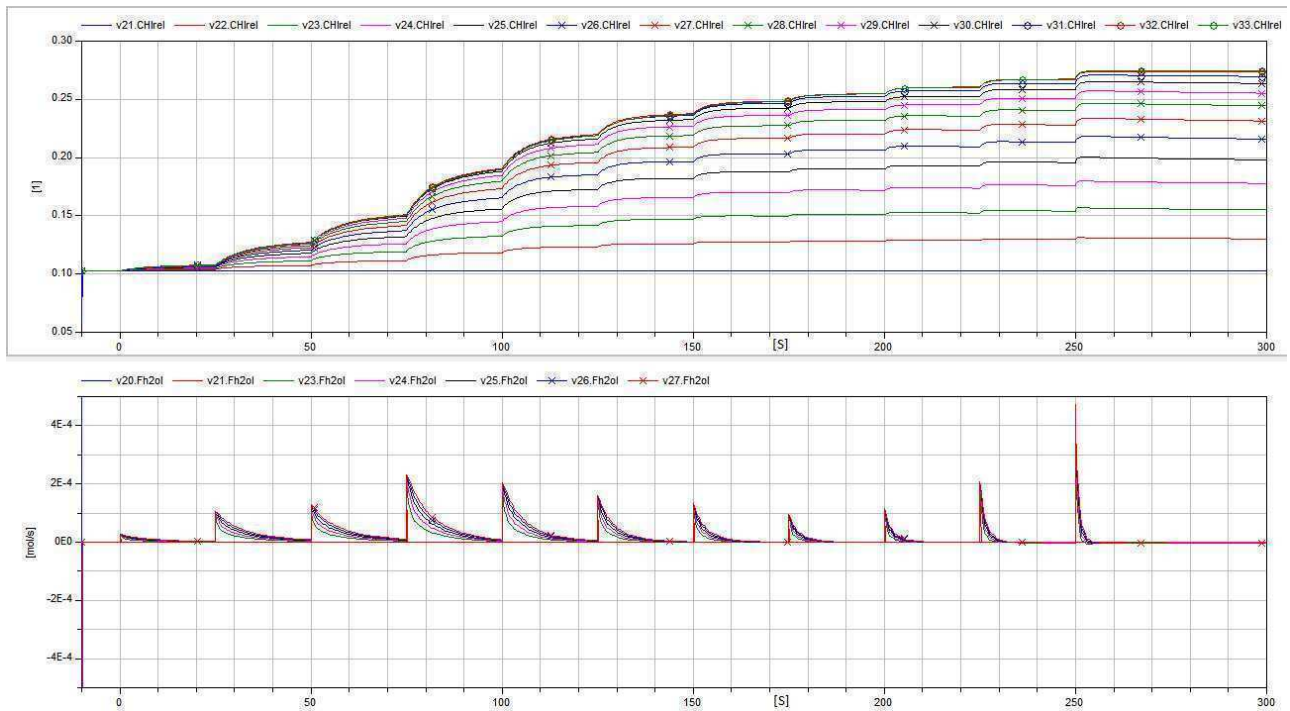


Figura 59 Llenado de las primeras capas

En vistas de los resultados de la simulación se obtienen las siguientes conclusiones sobre el encharcamiento.

- El encharcamiento es ahora considerable, llegando hasta el 25% de la masa máxima admisible en algunos volúmenes.
- El encharcamiento es principalmente debido al arrastre electroosmótico.
- Los saltos en la carga de agua se deben a que la conductividad protónica se reduce a lo largo de la capa catalítica. Teniendo en cuenta que una mayor corriente protónica significa un mayor arrastre electroosmótico, al contemplar ahora que en un volumen de control por un lado le entra más agua electroosmótica (mayor  $I_p$  en el volumen anterior) y por el otro le sale menos agua electroosmótica (menor  $I_p$  en el volumen siguiente), la diferencia es el agua entrante al volumen de control y que contribuye al aumento del encharcamiento.
- Por el contrario, en la membrana no hay saltos en la carga de agua debido a que la corriente protónica es constante a su través.
- El flujo de agua líquida por difusión se opone a la corriente electroosmótica y tiende a neutralizarla pero con un orden de magnitud variable en función de las concentraciones.
- El valor en equilibrio de la carga de agua es fruto del balance entre el agua que entra aportado por las corrientes electroosmóticas, y el agua que sale por difusión debido al gradiente de concentraciones.
- El salto en los valores de la carga de agua relativa en la mitad inferior de la figura 58 y que se refieren a la capa difusora, se deben a la mayor porosidad de ésta. En términos absolutos, la carga de agua o las concentraciones no presentan dicho salto.
- La forma en escalones se debe al efecto dominante que produce el encharcamiento, eso puede ser la generación eléctrica pero en este caso el efecto dominante es el arrastre electroosmótico. Tanto en la membrana como en la difusora la forma en la que varía la carga de agua no presenta la forma de escalones. En el caso de la difusora eso es porque no hay arrastre electroosmótico y sólo está el fenómeno de difusión. En el caso de la membrana porque el arrastre es constante a su través y por lo tanto las diferencias en la carga de agua también se deben al fenómeno de difusión.
- Se ha supuesto en todo momento que siempre hay suficiente agua líquida para aportar al arrastre electroosmótico. En el caso de que tal condición no se cumpliera debido por ejemplo a una insuficiente hidratación en el ánodo o a una excesiva temperatura, el resultado sería una caída en el potencial debido a que la conducción protónica se vería afectada a peor. Eso supone que en el modelado del ánodo se podría tener en cuenta el hecho de considerar la existencia de un sobrepotencial de arrastre en función de la carga de agua líquida. También supone modelar los ciclos del agua en el ánodo.
- El máximo de encharcamiento se produce en el volumen de control 33 de 60. Eso es casi el centro de la catalítica aunque ligeramente desplazado hacia la difusora, por donde se evacúa la mayoría del agua líquida.

Teniendo en cuenta la influencia en la potencia de la pila, en las siguientes subsecciones se analiza cómo fluctúa el encharcamiento en función de algunos parámetros de este modelo.

### 3.3.3.2. Variación en función de la hidratación

La hidratación en este modelo y en los dispositivos reales, se controla mediante la aportación de una cierta cantidad de vapor de agua a la mezcla de gases de alimentación. La hidratación es muy importante puesto que de ella depende la conducción protónica. También la presencia de una cierta cantidad de agua líquida es importante.

En las pruebas que a continuación siguen, se va a variar la presión de vapor de agua por igual en las dos tomas de la célula, pero estando siempre por debajo de la presión de saturación. Sobrepasar esa presión generaría agua líquida lo cual puede o no ser beneficioso depende de las cantidades. En todo caso y debido a que la parte de modelado anódico y de los colectores no está implementada, la evolución de la carga de agua en los colectores y en función de la presión de vapor u otros parámetros queda pendiente. Siendo así, en este modelo tan sólo se va a variar la presión de vapor de agua y considerar constante la carga de agua en el modelo "terminales".

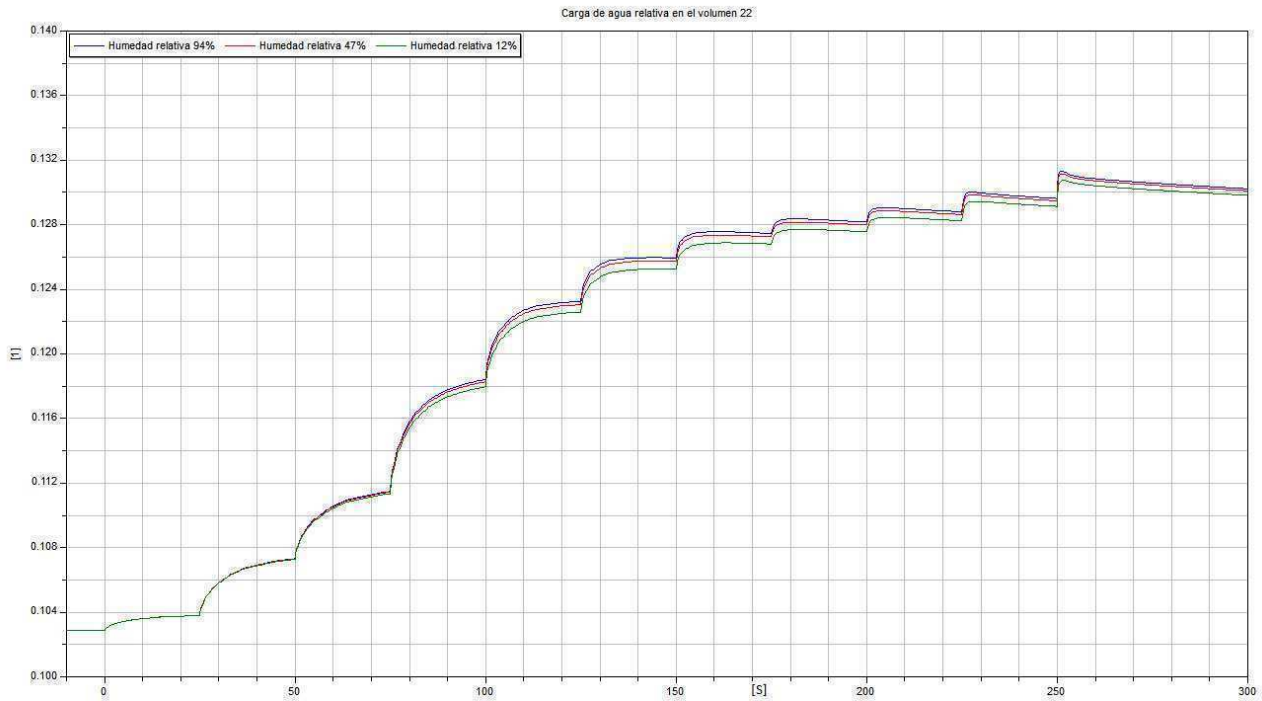


Figura 60 Carga de agua relativa en el volumen 22

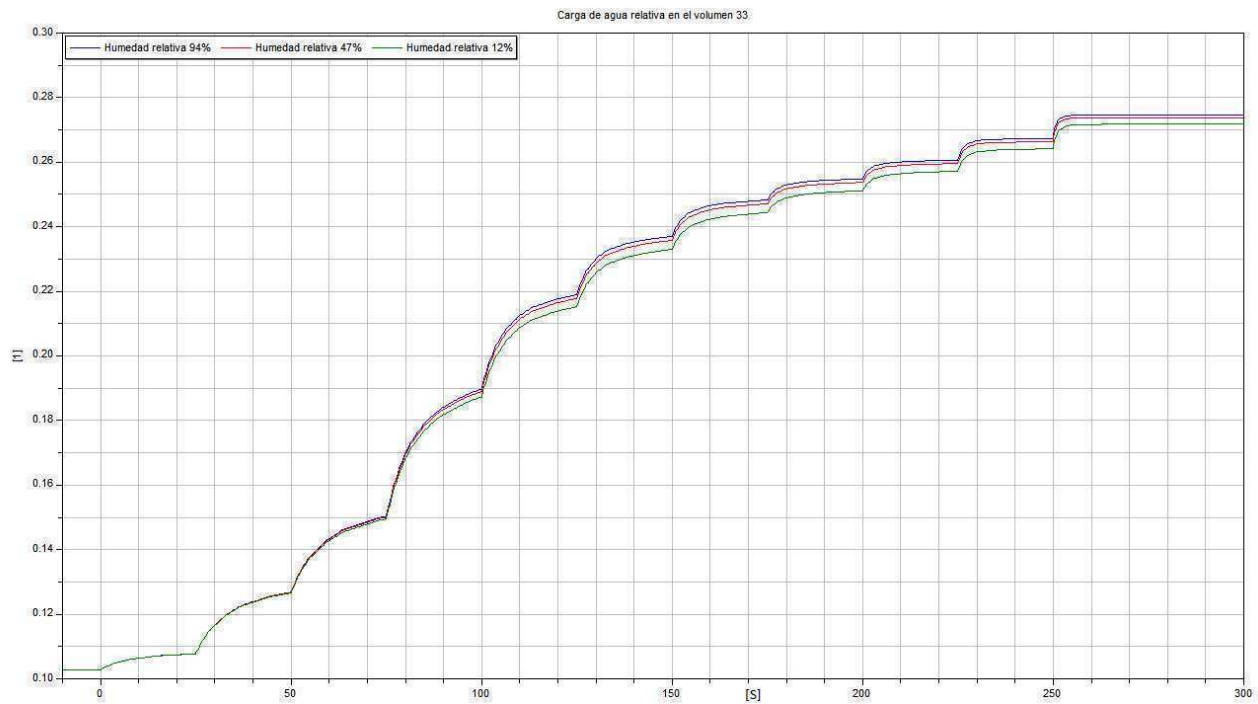


Figura 61 Carga de agua relativa en el volumen 33

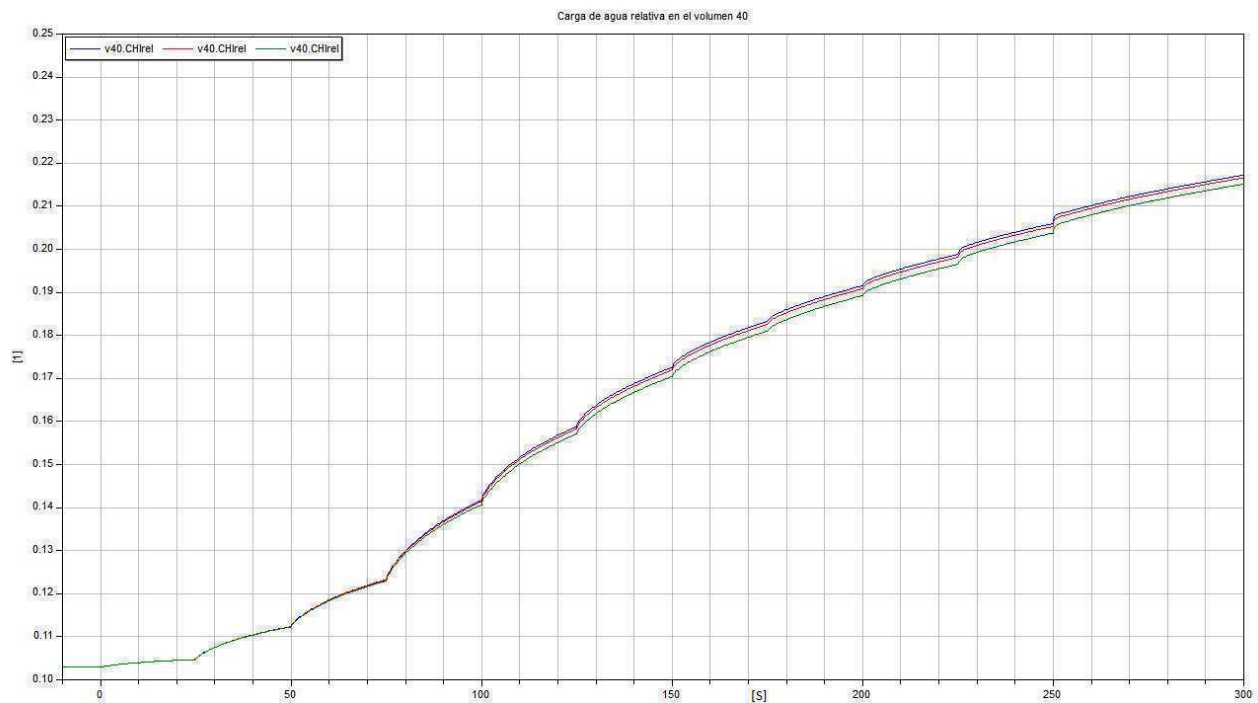


Figura 62 Carga de agua relativa en el volumen 40

Han sido tomados los valores de  $\chi_{rel}$  en las fronteras de la capa catalítica y también en el volumen donde presenta su máximo (el 33). La simulación con escalones pone de manifiesto la evolución en la carga de agua y sus transitorios.

Las tres figuras y dentro de ellas las tres gráficas, comienzan juntas y se van separando a medida que pasa el tiempo y por lo tanto a medida que hay más corriente. Si la influencia de la hidratación fuese relevante, se manifestaría en todo el tiempo de simulación. La conclusión es que la carga de agua varía con el tiempo.

Por un lado lo que se espera de aumentar la presión de vapor es que se condense más agua. Sin embargo dicha condensación debería ser prácticamente constante en el tiempo y no es así. No se debe entender con esto que no hay un aumento en la condensación, sino que éste no es apreciable en estos resultados. Lo que sí es apreciable es que al aumentar las corrientes las curvas se separan.

La explicación de eso es la siguiente. Cuando se aumenta la corriente aumenta la presión de vapor de agua, pero no lo suficiente para que influya en los resultados. También al aumentar la hidratación mejora la conductividad protónica, tal como se vió en 3.3.1.3. y con ello aumenta la tensión de pila. Entonces resulta que con mayor hidratación se obtienen mayores corrientes.

Una mayor corriente supone un mayor arrastre electroosmótico y como se ha explicado en 3.3.3.1. supone un mayor encharcamiento.

En definitiva la causa principal de la variación del encharcamiento con la presión de vapor se debe indirectamente a la variación de la conductividad protónica y directamente a la consecuente variación en el arrastre electroosmótico. Eso sí explica porqué se separan las gráficas a medida que circula más corriente.

La conclusión es que las variaciones en este parámetro sí se hacen notar en los resultados pero no en gran medida, aunque mermando la hidratación, disminuye la tensión de pila y el encharcamiento, lo que se pierde no es excesivo al menos si no se baja del 12% de humedad relativa. Si se bajase de dicha humedad relativa, podrían aparecer resultados muy malos como se reflejó en 3.3.1.3.

Sin embargo el margen de pesiones de vapor de agua en el que se puede operar la pila sin que reduzca demasiado la tensión de pila es muy grande. Aunque conviene mantener bien hidratada la pila, se permiten fluctuaciones.

### 3.3.3.3. Variación en función de la temperatura de disipación

Lo que cabe esperar a este respecto es que un aumento de la temperatura suponga un aumento en la cantidad de agua evaporada y por ende, una disminución del encharcamiento. También en ese mismo sentido, aumentar la temperatura significa que la tensión de Nernst disminuye y con ella la corriente y el arrastre electroosmótico. Nuevamente eso contribuye a un menor encharcamiento.

Por lo tanto y con este modelo, se espera una disminución en el encharcamiento debida al aumento de temperatura de disipación.

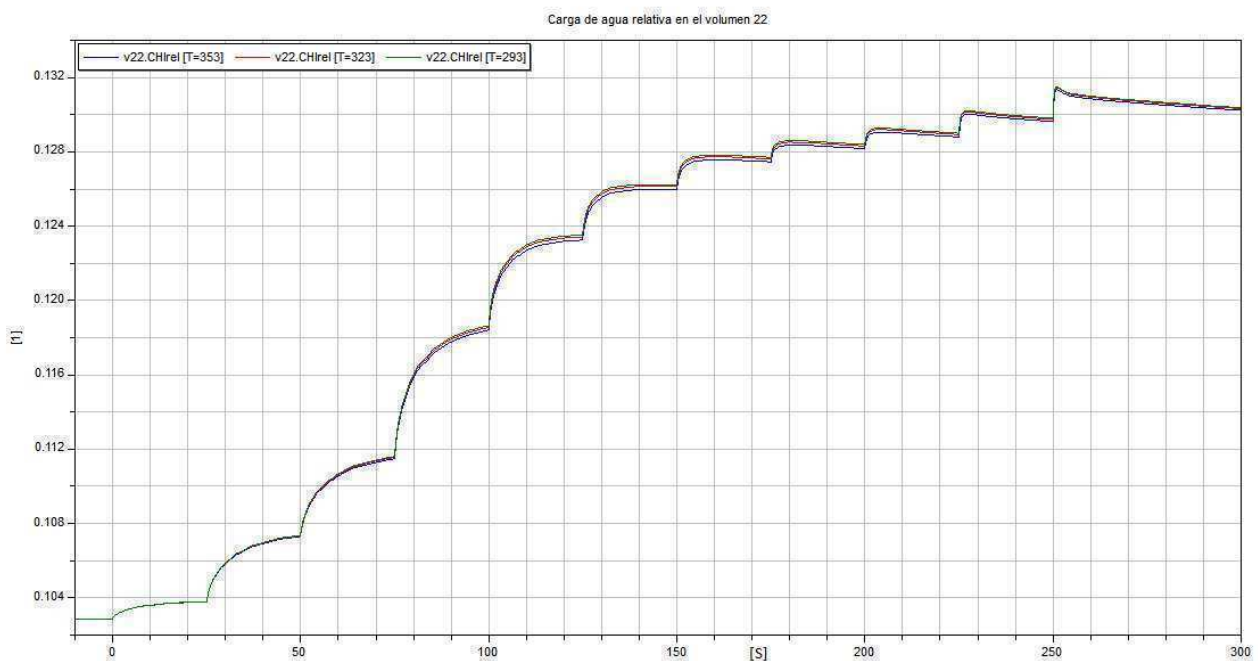


Figura 63 Carga de agua relativa en el volumen 22

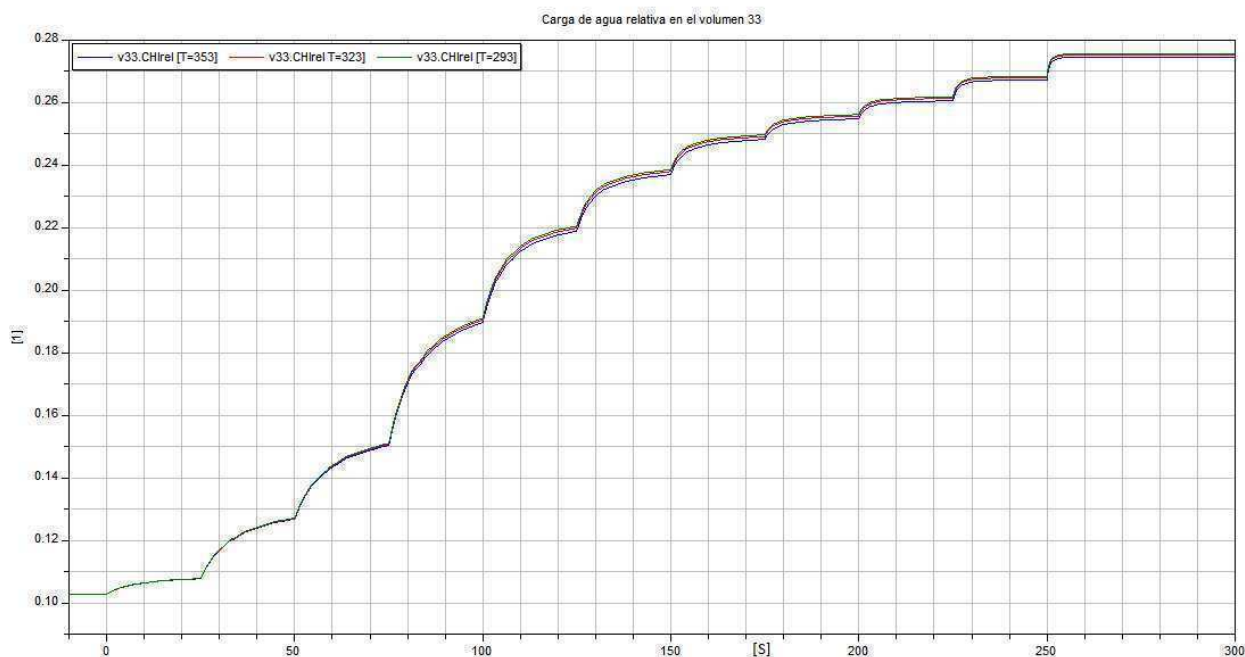


Figura 64 Carga de agua relativa en el volumen 33

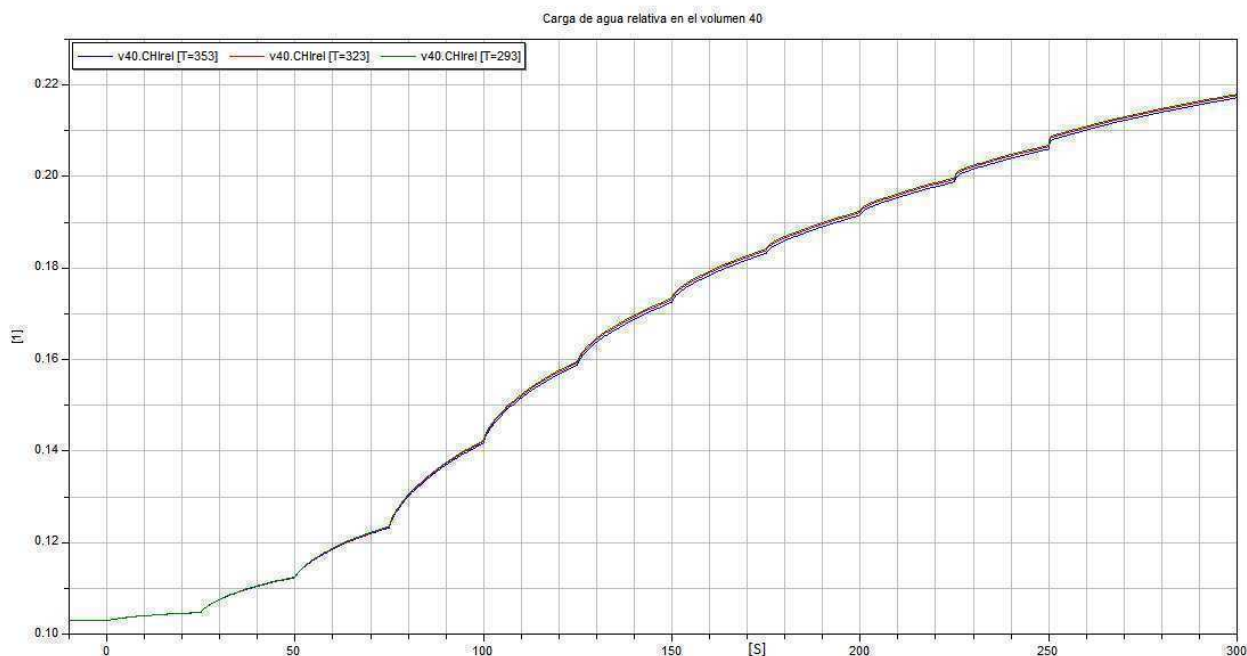


Figura 65 Carga de agua relativa en el volumen 40

Los resultados de la simulación se corresponden con las hipótesis. De modo similar a la subsección anterior, las gráficas coinciden en el origen para luego separarse a medida que la corriente va aumentando. Eso confirma a la bajada en la corriente electroosmótica como la principal causante del descenso en el encharcamiento. La evaporación sigue contribuyendo varios órdenes de magnitud menos en el secado de la pila. Si la temperatura se elevase por encima de los 90°C y el modelo fuese más preciso a dicha temperatura, se correría el riesgo de que la evaporación fuese mucho más importante o incluso que se llegase a la ebullición, con lo que la pila estaría siempre sin agua líquida y por lo tanto la conducción protónica se vería prácticamente impedida.

La conclusión es que la influencia de este parámetro es moderada, salvo que la temperatura cruce por encima de los 90 ó 100°C. El empleo de un sistema de disipación térmica que mantenga la pila caliente en torno a la temperatura óptima de 80°C pero sin que se dispare, es muy importante en el diseño de generadores PEM.

### 3.3.3.4. Variación en función de la conductividad térmica

Tal y como se comprobaba en 3.3.2.4. la conductividad térmica no va a producir efectos apreciables en el encharcamiento en estado estacionario. Anteriormente se obtuvo la conclusión de que los transitorios en la evolución de la temperatura son los únicos afectados pero no en gran medida, apenas algunos segundos de diferencia separan las curvas de evolución de las temperaturas. Eso implica que la única zona donde se podría notar diferencia es justo en los instantes en los que se producen los escalones de corriente y el calor generado aumenta. Como dicho aumento es pequeño y como la gráfica tiene 300 segundos de duración, la pequeña separación de unos pocos segundos al comienzo de cada gráfica no es perceptible.

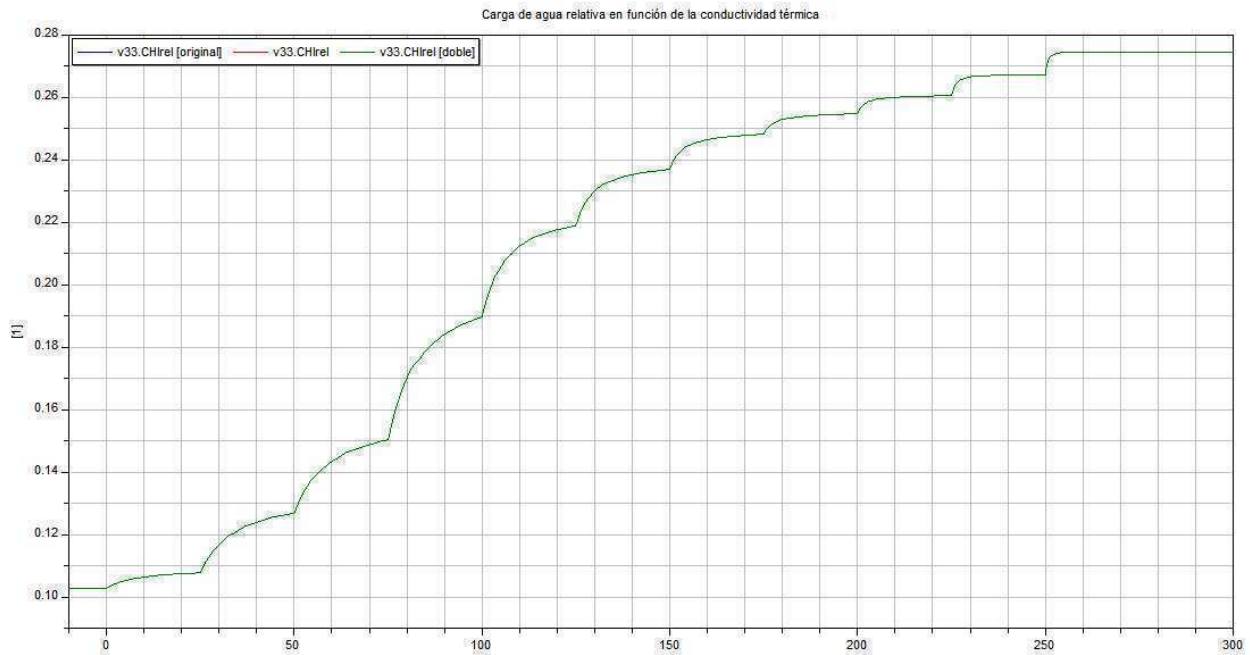


Figura 66 Encharcamiento en función de la conductividad térmica

En definitiva, la influencia de este parámetro en el encharcamiento no es un factor a tener en cuenta.

### 3.3.3.5. Variación en función del calor específico

Exactamente el mismo análisis que se ha hecho en 3.3.3.4. se debe hacer en esta subsección. Por lo tanto se esperan los mismos resultados.

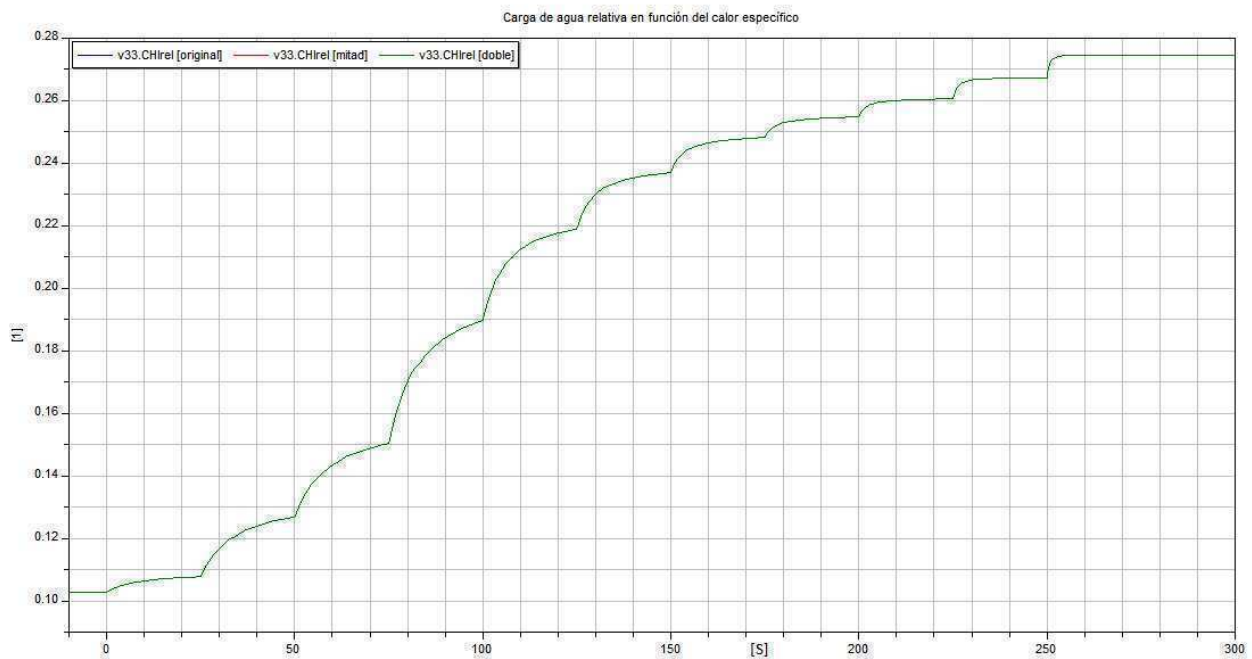


Figura 67 Encharcamiento en función del calor específico

Tampoco este parámetro influye significativamente en el encharcamiento.

### 3.3.4. El efecto refrigerante

#### 3.3.4.1. Variación del PPM en función de la temperatura de disipación

Este apartado es muy importante, puesto que en el diseño de generadores es importante considerar el hecho de que éstos funcionan, o deberían hacerlo, en el punto de potencia máxima. Por lo tanto es de considerable importancia conocer los factores que alterarán la posición y magnitud de dicho punto para funcionar siempre en él, y además, tratar de que éste posea la magnitud mayor posible.

El efecto de variar la temperatura de disipación en el PPM es este.

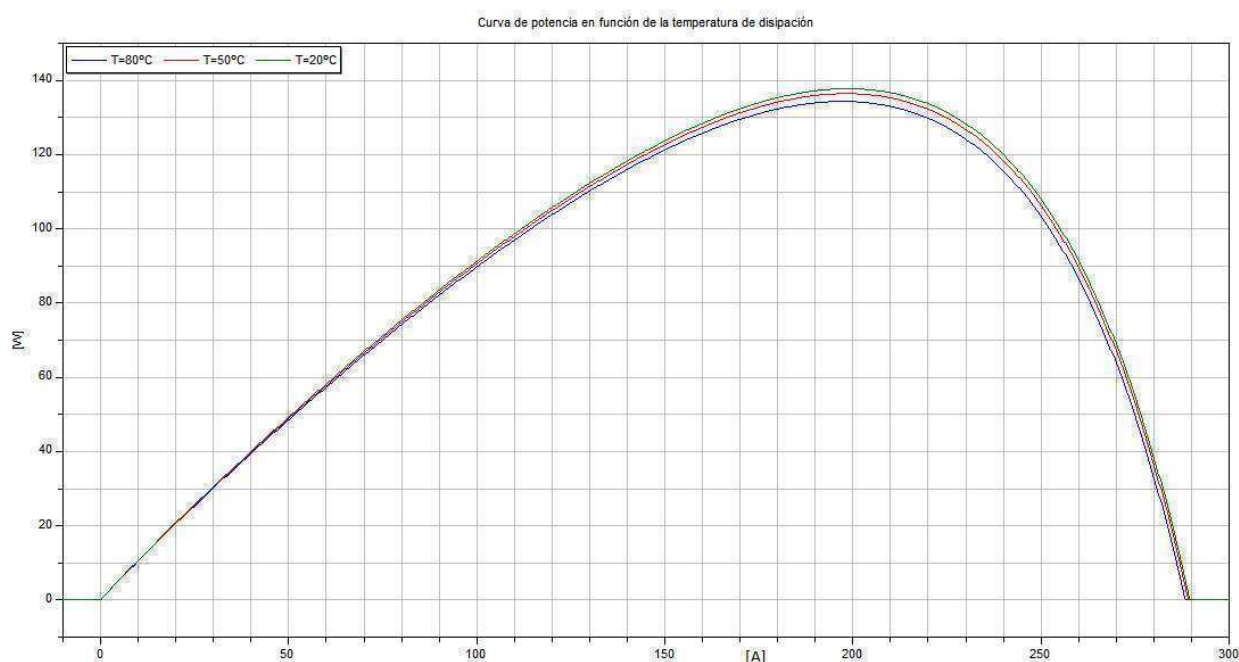


Figura 68 Influencia de la temperatura en el PPM

La influencia se hace notar, pero no es muy contundente. Es cierto que la potencia máxima disminuye con la temperatura, pero también es cierto que ni el modelo está completamente modelado ni esta pérdida es preocupante.

El PPM se reduce desde los 137(W) hasta los 134(W) a medida que la temperatura asciende desde los 20°C hasta los 80°C, además se aprecia la omnipresente presencia de la corriente electroosmótica en la separación progresiva de las curvas.

Es muy importante que el regulador conozca la variación del PPM en función de la temperatura u otros parámetros para diseñar un algoritmo que haga trabajar al generador en su PPM, pese a las variaciones de los otros parámetros. Aún así casi todos los valores se centran en seguir el punto de 1.5(V) en torno al que se sitúan dichos puntos.

Se esperaba una bajada en la potencia debido a la disminución con la temperatura de la tensión de Nernst y eso es de hecho lo que sucede. Eso no quiere decir que haya otros factores que influyan, sólo que el efecto dominante es el mencionado.

Como conclusión los efectos son apreciables pero no críticos, lo que da márgenes al diseño.

### 3.3.4.2. Influencia de la conducción

A continuación se representará la cantidad de energía que se disipa en forma de conducción térmica a través de las dos superficies posibles, a saber: el colector anódico y el catódico. Esos modelos están representados conjuntamente en el modelo "terminales".

Toda la energía de la reacción electroquímica se divide en dos partes. Una parte principal que se convierte en energía eléctrica utilizable y otra parte menor que se convierte en calor y representa las pérdidas de la reacción electroquímica.

La ecuación (3.25) en la sección 3.2.3. describe este fenómeno con precisión, pero lo cierto es que la generación térmica se reparte entre diversos lugares y por diversos fenómenos. Sin embargo como un compendio de todos ellos, lo que sí es fácil de apreciar son los flujos energéticos que entran o salen de la pila a través de los colectores, o en este caso, del modelo "terminales".

Al producirse la reacción una parte de la energía se extrae como energía eléctrica, otra parte se extrae a través de los mecanismos de transporte térmico, otra se emplea en la evaporación del agua y por último el resto eleva la temperatura de la pila. Este cómputo se lleva a cabo en cada volumen de control de modo que la temperatura no tiene por que ser homogénea. Adelantando un poco los resultados y sabiendo que la célula es muy fina, la temperatura de ésta sube muy poco con respecto a la temperatura de los colectores. Eso, junto con el hecho de que la evaporación de agua tiene también un orden de magnitud pequeño, implica que la mayoría del calor generado como pérdidas es disipado hacia los colectores, entonces la lectura de la energía térmica que atraviesa hacia los colectores en forma de conducción o convección da una idea muy aproximada de la cantidad de calor generado como pérdidas en la reacción.

Primeramente se representa la energía disipada por conducción, luego la disipada por convección y por último la energía empleada en cambios de estado del agua.

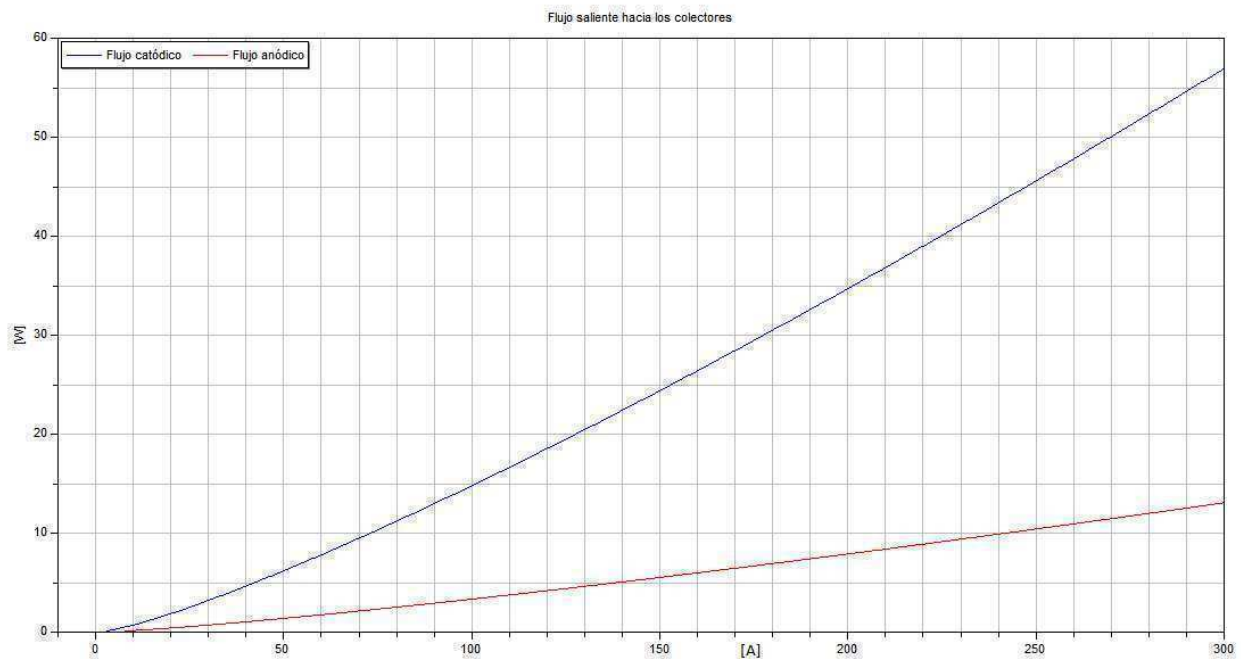


Figura 69 Flujos conductivos

La energía térmica es la suma de todos los fenómenos considerados. Apréciase que es monótona creciente, la potencia disipada es proporcional a la corriente.

En el PPM las potencias disipadas por el colector anódico y catódico son 7.78(W) y 34.15(W), un total de 41.93(W). Cuando se trabaja por encima del PPM, no sólo se entrega menos potencia eléctrica, sino que además se genera mucho más calor en la pila. Esta potencia disipada puede llegar hasta casi los 70(W) a cortocircuito.

Considérese por un momento que sólo hay pérdidas energéticas debidas a la conducción térmica, lo cual es bastante aproximado. Se tiene pues, que la potencia útil serían en el PPM  $P_{\text{útil}} = 134.32 (W)$  y la total  $P_{\text{tot}} = 41.93 (W) + 134.32 (W) = 176.25 (W)$ , el rendimiento sería:

$$R = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{tot}}} = \frac{134.32 (W)}{176.25 (W)} \rightarrow R = 76.2 \%$$

El rendimiento es mayor con corrientes menores.

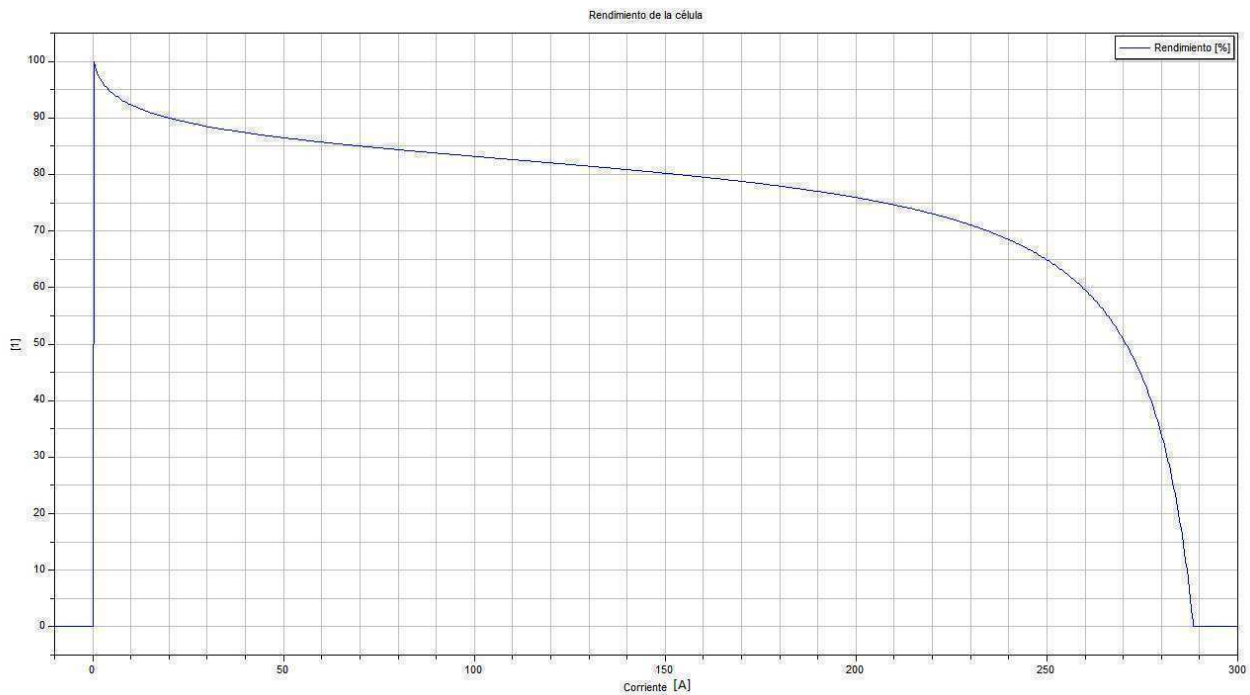


Figura 70 Rendimiento de la célula

En el comienzo de la gráfica, el rendimiento se va viendo mermado por las pérdidas térmicas cada vez mayores; y en el final por la pérdida de fuerza electromotriz que supone la suma de los sobrepotenciales.

Se comprueba que a corrientes menores el rendimiento es mayor, sin embargo los generadores se diseñan para trabajar en el PPM y obtener así la máxima rentabilidad económica. Aún así un rendimiento del 76% está muy bien comparado con el 30% aproximado de los combustibles fósiles en turbinas o motores de combustión interna, donde se aprovecha la fracción mecánica de la energía. Para una caldera de gas que emplearía la fracción térmica el rendimiento aumenta hasta el 70% o mayor si se emplea una caldera de condensación.

Desde luego estos resultados de potencias y rendimientos son muy alentadores en lo que al futuro de este tipo de generadores se refiere, pero la parte negativa sigue estando en el catalizador, realizado con metales nobles sigue siendo muy caro.

#### 3.3.4.3. Influencia de la convección

Ahora se analiza la aportación energética de la convección, que es muy pequeña precisamente debido a que el rendimiento de la pila es muy grande y por lo tanto fluye poco combustible al interior. Además estos combustibles (gases) están casi a la misma temperatura que la pila por lo que el efecto convectivo se hace muy pequeño. En algunos textos se comenta la posibilidad de refrigerar haciendo que los gases o líquidos que entran en la pila estén más fríos y en ese caso el efecto convectivo sería mayor. Como de momento los colectores no están completamente modelados, no se ha considerado que los gases entren a otra temperatura distinta de la del colector de modo que la principal fuente de refrigeración será la conducción.

En la convección se toman en consideración tan sólo al agua líquida y vapor, mientras que se ignora al oxígeno, puesto que su calor específico es la mitad que el del vapor y la cuarta parte que el del agua líquida. Por lo tanto hay dos especies (consideradas) involucradas en la disipación térmica por convección.

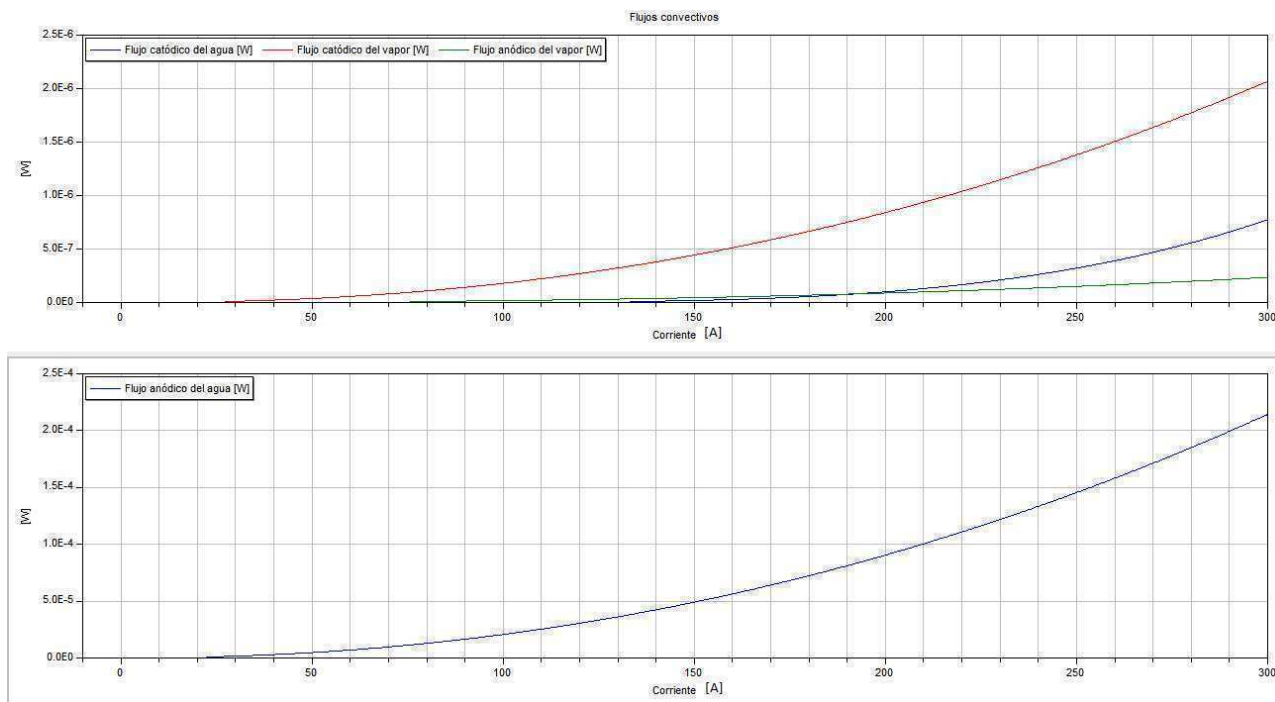


Figura 71 Flujos convectivos

Todos los flujos son positivos lo que quiere decir que se extrae calor de la pila por convección. El orden de magnitud de casi todos ellos es de  $10^{-6} - 10^{-7}$  (W), salvo la aportación del agua líquida por el ánodo que es la principal fuente de refrigeración convectiva con un orden de magnitud de  $10^{-4}$  (W). Con un agua líquida más fría se podría llegar a enfriar la pila en cantidades significativas, contribuyendo de forma importante al efecto refrigerante.

Al no haber considerado estos flujos en el cálculo del rendimiento no se ha cometido apenas error debido a su pequeño orden de magnitud, cuanto menos en las condiciones de la simulación.

En conclusión, la convección es un sistema que refrigera la pila en un orden de magnitud bastante menor que la conducción, pero se muestra al agua líquida anódica como un buen candidato para contribuir a la refrigeración, siempre que ésta previamente se enfríe. Hay que tener en cuenta que el propósito de este trabajo es el modelado, y eso es lo que se ha conseguido con estos flujos convectivos al margen de si los resultados deben o no tenerse en cuenta en el diseño.

#### 3.3.4.4. Influencia de la transición de estado del agua

La evaporación del agua es el último de los mecanismos considerados que en este caso absorbe calor. Recordando las fórmulas implicadas en la evaporación:

$$G_v = -L_v G_{H_2Og}$$

$$G_{H_2Og} = -G_{H_2Ol}$$

$$G_{H_2Ol} = \frac{V_g \alpha_v \beta (P_{H_2Og} - P_{H_2Og}^{\text{sat}})}{RT}$$

Se deduce que tanto el consumo de energía como la evaporación están relacionadas con el volumen de gas dentro de los poros y con la presión de vapor de agua.

La forma en la que evoluciona el calor empleado en evaporación es:

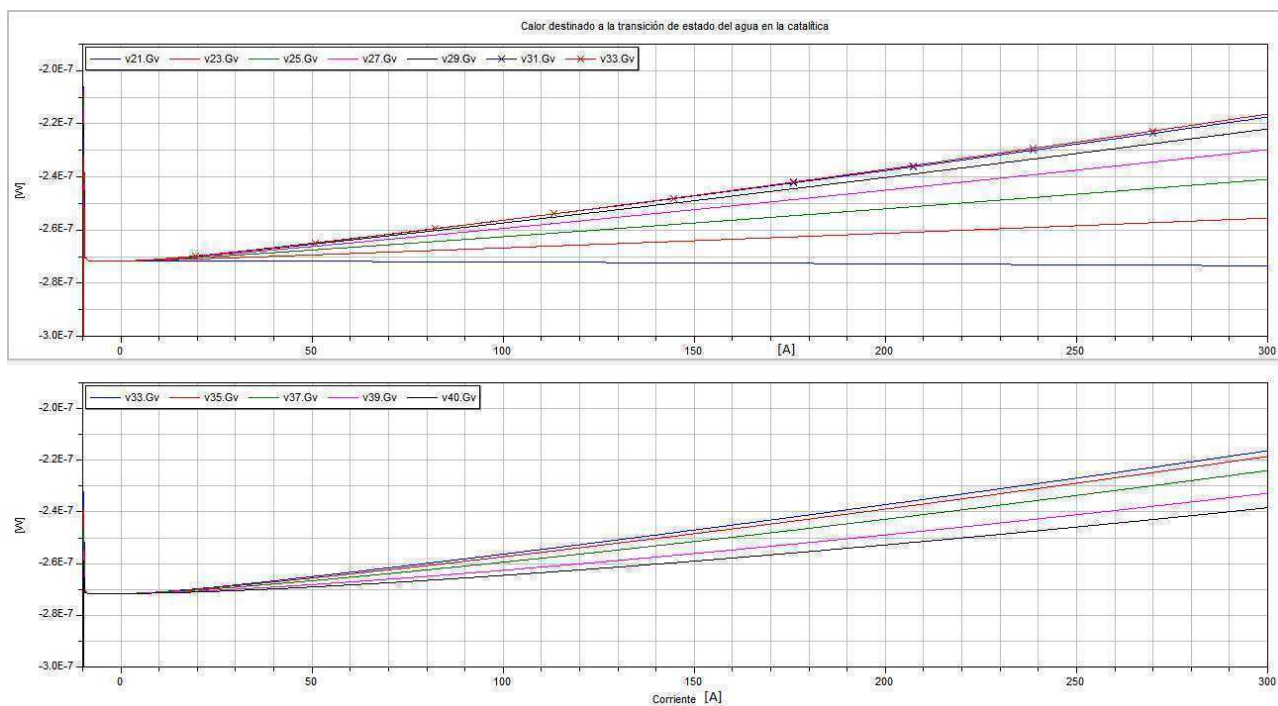


Figura 72 Calor de evaporación en la catalítica

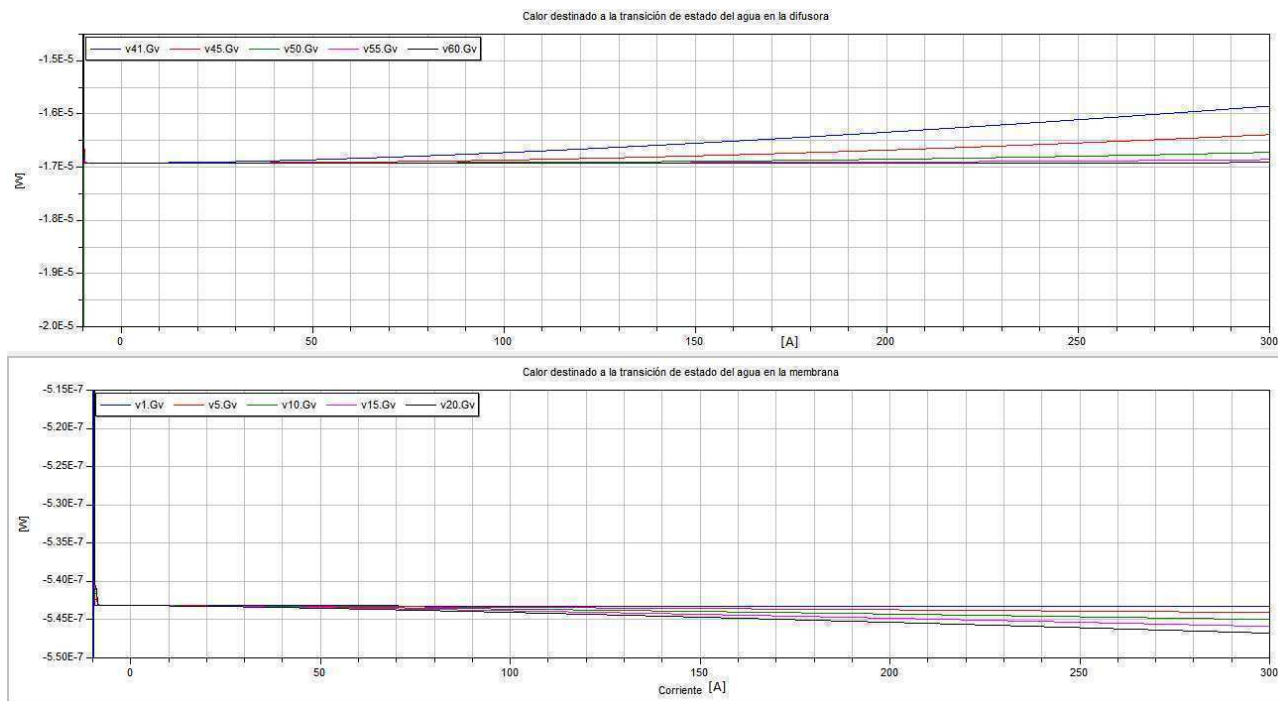


Figura 73 Calor de evaporación en la membrana y la difusora

Lo primero que se aprecia es que su signo es negativo, luego absorbe energía y se produce evaporación.

Lo siguiente, es que varía con la corriente aplicada, y de entre los dos posibles responsables de dicha variación (volumen de gas y presión de vapor de agua), el responsable principal va a ser el volumen de gas. Como la carga de agua varía con la corriente, al haber menos volumen de gas hay menos superficie de condensación y por lo tanto menos evaporación en la difusora y la catalítica. Como la membrana se vacía ligeramente, el efecto es el contrario.

El orden de magnitud ronda los  $10^{-7} - 10^{-5}$  (W), lo que es muy poco comparado con la transmisión de calor por conducción.

La mayor evaporación y por lo tanto el mayor enfriamiento por este efecto se produce en la difusora, puesto que esta es más porosa que las otras y por lo tanto la evaporación está favorecida.

Éste podría ser un mecanismo de enfriamiento más importante si trabajásemos a temperaturas mayores. Repito que habría que refinar el modelo en lo que a la presión de vapor se refiere, puesto que no es preciso al acercarnos a los 90 ó 100°C.

En definitiva el calor empleado en evaporar agua y la influencia en el balance energético es muy pequeña en las condiciones del experimento. Eso no quita que variando las condiciones, este efecto no pueda llegar a ser tenido en cuenta. Por lo tanto un efecto fuertemente dependiente del encharcamiento la temperatura y las presiones de vapor en los colectores, que aunque tiene poca influencia debe ser observado con prudencia al cambiar las condiciones del experimento y por lo tanto también al hacer las consideraciones en la fase de diseño.

---

### 3.4. Resumen y conclusiones

A estas alturas, se acaba de completar y probar el modelado térmico de la librería. Eso ha otorgado al modelo mucha más información pero a cambio la velocidad de simulación se ha reducido. El causante principal de ese retraso es la definición basada en eventos de la convección.

Existen dos posibilidades, la primera sería no tener en cuenta el fenómeno de la convección en el balance térmico y la segunda sería la posibilidad de activarlo o desactivarlo en función del valor de algún parámetro booleano. Esa es una nueva línea de trabajo que se abre y que puede ser interesante si el modelo se hace demasiado grande.

Aún así el modelo funciona rápido y ha ofrecido algunos resultados importantes:

- El modelo no adquiere una temperatura mucho mayor que la presente en sus colectores, debido a su buena conductividad y pequeña longitud.
- El principal mecanismo de transmisión y disipación del calor generado es la conducción.
- El flujo electroosmótico disminuye significativamente la potencia y el rango dinámico de la célula PEM.
- La principal fuente de calor es la pérdida por activación, seguida en mucha menor medida del efecto joule.
- El rendimiento de la pila es muy bueno o excepcional, si se opera por debajo del PPM.
- La dinámica de la pila es bastante rápida, durando los transitorios sólo algunos segundos.
- Las pérdidas por conducción protónica son ahora menores pero dependientes de la hidratación.

Ahora quedan algunos trabajos pendientes como la depuración del modelo de presión de vapor y el modelado del efecto disipativo en los colectores.

Definitivamente un modelo que funciona bastante bien y que explica un montón de fenómenos en el interior de la célula PEM.

# 4

## Análisis mediante modelado del ánodo

### 4.1. Introducción

Termina este trabajo con el modelado del ánodo y un modelado parcial de los colectores. El objetivo es seguir completando el modelo y también revisar errores o carencias que este tuviese hasta ahora.

Las novedades para este capítulo son las siguientes:

En primer lugar se modela el ánodo de forma muy similar a como se modeló el cátodo pero con parámetros y especies distintas.

En segundo lugar se incorpora en el modelo "terminales" parte del modelado de los colectores, que puede servir como punto de partida para futuras líneas de trabajo en lo que a la creación de un modelo colectores se refiere.

Por último se modifica la documentación del modelo para centrarla en la funcionalidad antes que en la descripción.

Las simulaciones en función de los parámetros macroscópicos deberían ser lo bastante fieles siempre que los parámetros estén correctamente ajustados. Si esto es así, se puede obtener la descripción de una enorme cantidad de fenómenos inaccesibles de otro modo. Se trata de una herramienta con la que a partir de los valores macroscópicos deducir los datos inaccesibles, o bien a partir de las medidas de pilas reales y mediante ajuste de parámetros, averiguar datos y parámetros de los materiales de la pila. En definitiva se puede usar en ambos sentidos.

### 4.2. Modelado matemático

#### 4.2.1. Estructura del modelo

Todos los componentes del modelo se hallan en una librería de carpeta única que se llama "Celula\_PEM\_3.mo", además el código de la librería se encuentra en el *anexo A*.

Se diferencia de las anteriores en que se han eliminado componentes de poco uso como las fuentes de presión, que en realidad sólo sirven para ir probando y depurando los modelos.

También se ha modificado, buscando la funcionalidad, la documentación de los componentes.

Teniendo en cuenta que ahora se han creado modelos para el ánodo, la forma correcta de ensamblarlos está descrita en la sublibrería modelos compuestos, y puede verse el ejemplo de pila montada en la siguiente figura.

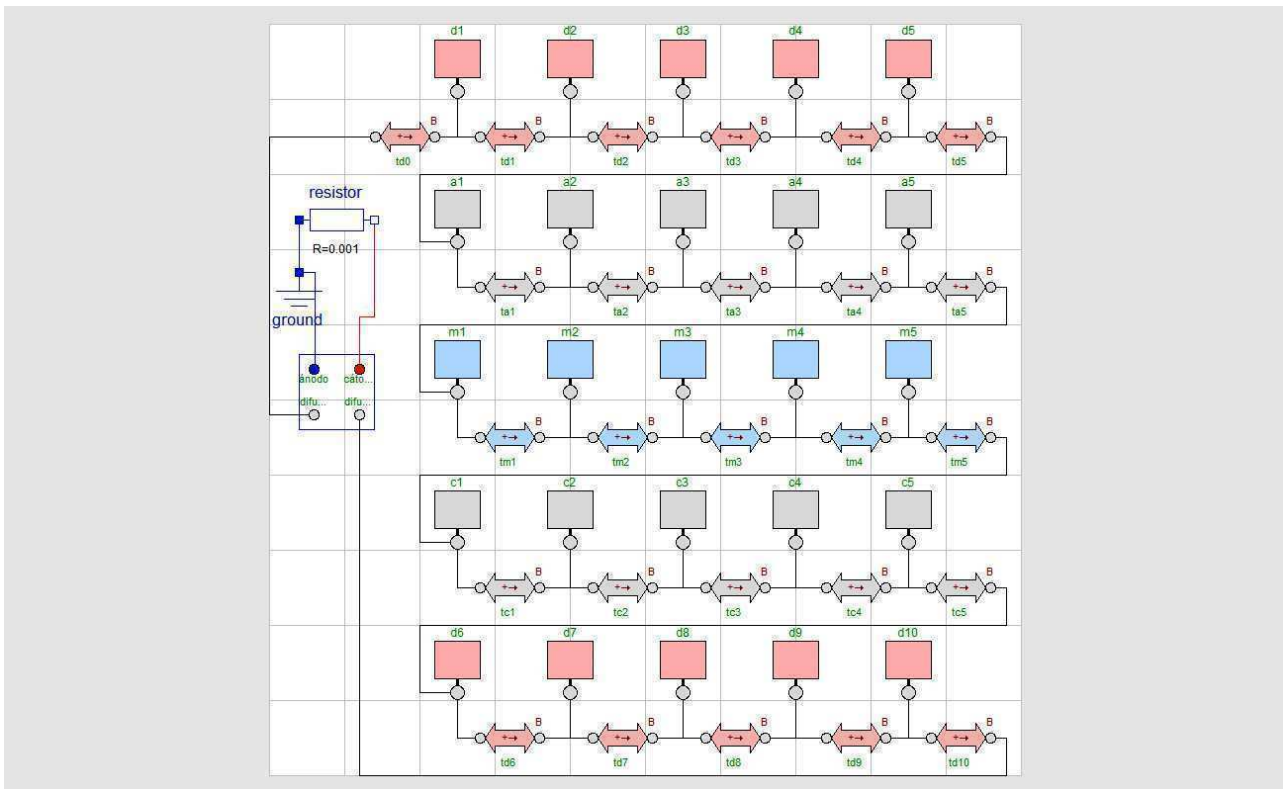


Figura 74 Estructura del modelo

Ahora se modelan tanto la reducción del oxígeno en el cátodo, como la oxidación del hidrógeno en el ánodo.

La forma de estructurar la librería y de conectar los componentes sigue las mismas pautas que las reflejadas en 2.2.1. por lo que no se repetirán. También la función y colocación de cada capa de la pila han sido de sobra descritas.

Por el momento no ha sido tenido en cuenta el efecto crossover de los gases, pero tal y como se ha modelado la pila hay condiciones para poder simularlo en una futura línea de trabajo. Sin embargo y por el momento, todo efecto crossover se simularía como una impedancia en paralelo a la carga.

El modelado parcial de los colectores se hace por el momento a través del modelo "terminales", no existiendo un modelo para los colectores como tales.

#### 4.2.2. Difusión de las especies

Sea la siguiente aproximación de lo que sucede en el interior de la pila. Las especies que están implicadas son las siguientes:

1. Agua líquida
2. Vapor de agua
3. Hidrógeno gaseoso
4. Oxígeno gaseoso

Sin embargo no necesariamente están todas presentes en cada capa, por lo menos en las condiciones en las que se va a aplicar el modelo, a saber:

- En la difusora anódica se encontrarán la 1, 2 y 3.
- En el ánodo la 1, 2 y 3.
- En la membrana la 1 y la 2.
- En la catalítica la 1, 2 y 4.
- En la difusora la 1, 2 y 4.

Apréciase la hipótesis de que la membrana actúa de barrera perfecta y no permite el efecto crossover, con lo que ni el hidrógeno ni el oxígeno la cruzan. También es cierto que el modelo está en condiciones de simular el efecto crossover y permitir el paso de cualesquiera especies en cualquier capa. No se aviene a lo anterior el hidrógeno ionizado en forma de protones y que solvatado o a través de la misma estructura del NAFION cruza la membrana.

Todas las especies salvo los protones se rigen por la ecuación de difusión (2.1) y (2.4), sólo que con distintos coeficientes y considerando tanto difusión ordinaria binaria como difusión Knudsen (2.2) y (2.3). La difusión ordinaria se aplica a la combinación de gases atravesando un medio poroso genérico, mientras que la difusión Knudsen afecta a un gas que atraviesa un material cuyos poros son largos y estrechos, de modo que las colisiones con las paredes de los poros son más frecuentes que las colisiones con otras moléculas de gas.

Para el caso de los protones atravesando las capas que contienen NAFION, se ha empleado una descripción ohmica de su transporte pero con una resistividad variable en función de la hidratación, en la forma ya descrita en 3.2.2.

### 4.2.3. Reacción electroquímica

La reacción ha sido ampliamente explicada en 3.2.1. sin embargo queda una cosa por comentar. Al haber añadido el ánodo y para completar la descripción matemática del mismo, hay que aplicar nuevamente la ecuación de Butler-Volmer en este caso al ánodo.

$$E_{act} = B \text{Log} \left[ 1 + \left( \frac{I_{linea}}{A_{act} I_{0ref}} \right) \right] \quad (\text{ecuación de Tafel desarrollada; ver anexo B}) \quad (4.1)$$

Hay un sobrepotencial anódico de activación para la reacción de oxidación del hidrógeno. En el modelo se exporta dicho valor y se suma al sobrepotencial de activación catódico para calcular así el sobrepotencial total de activación.

Los valores de pendiente de Tafel y área activa son distintos a los de la reacción catódica, de manera tal, que el sobrepotencial anódico será menor que el catódico. Es eso un fiel reflejo del hecho de que la reacción de disociación y oxidación del hidrógeno es más rápida y efectiva que la del oxígeno en el cátodo, aproximación ésta que hasta ahora se estaba haciendo.

Aparecen pues dos nuevos sobrepotenciales a tener en cuenta, por un lado el ya comentado sobrepotencial de activación anódico que se sumará al catódico, y un sobrepotencial de concentración del hidrógeno parecido al del cátodo.

A continuación se describe este último, pues tiene algunas diferencias con el del cátodo.

La ecuación que da el sobrepotencial en función de la presión ponderada es similar a la (2.20).

$$E_{H_2} = \begin{cases} \left( C_1 e^{\left( \frac{P_{0H_2}}{P_{xH_2} - P_{inf}} \right) - C_2} \right) / A & \forall P_{xH_2} > P_{corte} \\ \left( C_1 e^{\left( \frac{P_{0H_2}}{P_{corte} - P_{inf}} \right) - C_2} \right) / A & \forall P_{xH_2} \leq P_{corte} \end{cases} \quad (\text{ecuación inspirada en [4] pero ajustada a las características de esta pila; ver anexo B}) \quad (4.2)$$

$$P_{xH_2} = \sqrt{(1 - \chi_{rel})} P_{H_2} \quad (4.3)$$

La presión ponderada tiene la potencia 1/2 para representar una menor influencia de las cargas de agua menores al 20 ó 30%. Por lo tanto con una misma carga de agua y presión de gas, el ánodo tendrá una presión ponderada mayor que el cátodo. Esa es la forma de simular la menor influencia del ánodo en la dinámica de la pila.

Salvo estos sobrepotenciales y los valores de algunos parámetros que luego se comentarán y que reflejarán las características propias del ánodo, no hay más novedades en cuanto a modelado matemático se refiere.

Las ecuaciones ahora reflejan consumo de hidrógeno y no de oxígeno (reacción anódica).

$$G_e = -I_{linea} \quad (4.4)$$

$$G_{H_2}^{react} = \frac{G_e}{4F} \quad (4.5)$$

Además no hay corriente ni generación electrónica, sólo protónica.

$$I_e = 0 \quad (4.6)$$

$$\varepsilon = 0 \quad (4.7)$$

Todo el potencial se genera en el cátodo. Aunque en realidad se genera en los dos terminales, suponer que el potencial en el ánodo es cero y a partir de cero en el cátodo se va elevando el potencial, es una forma sencilla de calcular el potencial de Nernst. Luego se restan los sobrepotenciales obteniéndose la fuerza electromotriz de la pila.

Por último, en el ánodo no hay sobrepotencial de concentración de oxígeno, lo mismo que en el cátodo no lo hay de hidrógeno.

### 4.2.4. Humectación de la pila

Este es un tema enormemente importante para el correcto funcionamiento de la pila. Aunque se están haciendo avances por parte de DuPont para que el NAFION no sea tan sensible a la hidratación, de momento es necesario implementar un dispositivo de humectación de los gases, con el fin de que dicha humedad penetre en la pila y contribuya a la correcta conducción protónica de la membrana.

Por el momento no se va a considerar un modelado de los colectores, por lo que el proceso de humectación será de esta manera:

Los gases están acompañados de vapor de agua en una cantidad dada por su presión parcial de vapor. Ese vapor de agua se condensa en las paredes del colector proporcionando una cierta cantidad de agua líquida, pues bien, dicha cantidad va a ser expresada sin más pretensiones por una sencilla ley empírica.

$$\chi = K_1 \alpha^2 \quad (4.8)$$

$$\alpha = \frac{P_{H_2Og}}{P_{H_2Og}^{sat}}; K_1 = 2.28 \cdot 10^{-2} \quad (4.9)$$

$K_1$  está ajustado para que tenga el valor de aproximadamente 0.01 en las condiciones normales de funcionamiento.

Tanto el agua líquida como en su estado de vapor, viajan por difusión a lo largo de las capas de la célula galvánica. La única diferencia entre ellas es que el vapor lo hace en función del gradiente de presión y el agua líquida en función del gradiente de su concentración.

El agua líquida es necesaria en las capas de NAFION, bien sea porque se difunde o porque se condensa, pero es la responsable en buena parte del transporte de los protones hasta el cátodo según lo explicado en 3.2.2.

Con las consideraciones (4.8) y (4.9) se tiene un sistema para simular una carga de agua variable en los colectores y que responde a variaciones en la presión parcial de vapor de agua, con lo que se puede analizar la influencia de la humectación de los gases en el funcionamiento de la pila.

El modelo terminal contiene esta fenomenología, así como otras. Es ese modelo entonces el embrión del modelado de los colectores.

#### 4.2.5. Disipación y balance térmicos

En el capítulo 2, la disipación de los colectores se hizo considerando que éstos (englobados en el modelo "terminales") se encontraban a una temperatura fija, a resultas de aquello, el calor específico de los colectores es infinito y por lo tanto también su capacidad para absorber calor. Es necesario un modelado más preciso para la disipación térmica, con lo que además del modelado anódico se va a refinar el modelado térmico de los colectores en el modelo "terminales".

En la subsección 3.2.3. se han explicado los mecanismos de transmisión de calor y sus ecuaciones relacionadas. Específicamente se supone que la disipación emplea mayoritariamente el mecanismo de la convección y por ende la ecuación (3.16). La convección es un medio en general menos efectivo que la conducción como medio para transportar el calor, con lo que en general este mecanismo empeora la disipación térmica, lo que revierte por lo general en un mayor calentamiento de la pila. El flujo de la ecuación (3.16) es un flujo másico, mientras que en las (3.17) y (3.18) se emplea el flujo neto molar y se multiplica por la masa molar. A resultas de lo explicado, el flujo de aire refrigerante debe expresarse en moles por segundo, puesto que en el modelo se emplean las ecuaciones (3.17) y (3.18). En el cálculo del flujo molar se ha tenido en cuenta una densidad aproximada del aire de  $1.18 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$ .

El mecanismo físico de disipación consta de unos canales en los colectores donde a su través circula aire más frío y a resultas se enfría la pila. Eso supone lo siguiente, la magnitud de la disipación térmica va a depender a partir de ahora no sólo de la temperatura del refrigerante sino también del caudal del mismo que atraviesa los canales refrigerantes de los colectores.

En cuanto al balance térmico, debe englobar la convección disipativa, la conducción y las dos convecciones contributivas, así como la generación del efecto Joule.

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{F_{conv3\_1} + F_{cond1} + F_{conv1\_1} + F_{conv2\_1} + G_{j1}}{c_{Pcolector} \rho_s S_{vc} L_{vc}} \quad (4.10)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{F_{conv3\_2} + F_{cond2} + F_{conv1\_2} + F_{conv2\_2} + G_{j2}}{c_{Pcolector} \rho_s S_{vc} L_{vc}} \quad (4.11)$$

- $F_{cond}$  es el flujo conductivo generalmente hacia el colector.
- $F_{conv1}$  es el flujo convectivo del transporte de agua líquida.
- $F_{conv2}$  es el flujo convectivo del transporte de vapor de agua.
- $F_{conv3}$  es el flujo convectivo de la disipación térmica que en general se extrae del colector.
- $G_j$  es la generación de calor por efecto Joule.

Los subíndices 1 y 2 se refieren al cátodo y al ánodo respectivamente.

#### 4.2.6. Ensamblado del modelo y valores de los parámetros

El modelo seguirá con la estructura y la forma de conexión que ha venido teniendo hasta ahora y que se describen en 4.2.1.

Algunos parámetros han cambiado de valor y otros nuevos han aparecido. Sus valores han sido obtenidos de tablas en internet o en la bibliografía reseñada. Algunos otros como la pendiente de Tafel del ánodo o su área activa sencillamente han sido propuestos como los valores más bajos de entre el rango de valores que usualmente pueden tener.

Un ejemplo de la correcta forma de conexión de los elementos está en la sublibrería "modelos\_compuestos" de la librería "celula\_pem\_3" correspondiente a este capítulo.

En resumen, estos serán los valores de los parámetros:

<b>Catalítica</b>		
Ancho de la capa	$L_{tot}$	$4 \cdot 10^{-5}$ (m)
Número de volúmenes de control	$NUM_{vc}$	20
Tortuosidad	$\tau$	5
Sección del medio	$S_{vc}$	$1$ ( $m^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O, l}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la catalítica	$\rho_s$	$4000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	$R$	$8.31447$ ( $\frac{J}{^\circ K mol}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ ( $m^2$ )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria	$D_{O_2-H_2O, g}^{ref}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Ref. de presión para la difusión binaria	$P_g^{ref}$	$10^5$ (Pa)
Ref. de temperatura para la difusión binaria	$T_g^{ref}$	$308.1$ ( $^\circ K$ )
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O, l}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen)	$D_{O_2, K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{H_2O, gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.2
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Ref. de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 ( $^\circ K$ )
Densidad de generación electrónica del cátodo	$A_{act} I_0^{ref}$	$1.2$ ( $\frac{A}{m^2}$ )
Pendiente de Tafel	$B$	0.04 (V)
Referencia de presión del oxígeno en el cátodo	$P_{O_2}^0$	$10^5$ (Pa)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$1$ ( $\frac{S}{m}$ )
Potencial corrector (SP concentración)	$C_1$	1 (V)
Potencial corrector (SP concentración)	$C_3$	1 (V)
Factor corrector (SP concentración)	$C_2$	2.5
Presión de corte para el oxígeno	$P_{corte}$	65 000 (Pa)
Presión mínima permitida para el oxígeno	$P_{inf}$	52 000 (Pa)
Corrección de ganancia (SP concentración)	$A$	6
Entalpía de reacción, estado final gaseoso	$\Delta h$	$-241 818$ ( $\frac{J}{mol}$ )
Entropía de reacción, estado final gaseoso	$\Delta S$	$-42.5$ ( $\frac{J}{^\circ K mol}$ )
Calor específico del NAFION	$C_p$	$1047$ ( $\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}$ )
Conductividad térmica del NAFION	$\sigma_t$	$0.0586$ ( $\frac{J}{s \cdot m \cdot ^\circ K}$ )
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	$4181$ ( $\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}$ )
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	$2080$ ( $\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}$ )

Coefficiente de conductividad	$b_{11}$	$0.5139$ ( $\frac{1}{\Omega m}$ )
Coefficiente de conductividad	$b_{12}$	$0.3260$ ( $\frac{1}{\Omega m}$ )
Temperatura de ajuste	$b_2$	1268 ( $^\circ K$ )
Temperatura de ajuste	$t_2$	303 ( $^\circ K$ )
Coefficiente de solvatación	$S$	5

Tabla 8 Valores de los parámetros para la capa catalítica

<b>Difusora</b>		
Ancho de la capa	$L_{tot}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$ (m)
Número de volúmenes de control	$NUM_{vc}$	20
Tortuosidad	$\tau$	1
Sección del medio	$S_{vc}$	$1$ ( $m^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O, l}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la difusora	$\rho_s$	$4000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	$R$	$8.31447$ ( $\frac{J}{\text{°K mol}}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ ( $m^2$ )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria (cátodo)	$D_{O_2-H_2O, g}^{ref}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria (cátodo)	$D_{H_2-H_2O, g}^{ref}$	$0$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria (ánodo)	$D_{O_2-H_2O, g}^{ref}$	$0$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria (ánodo)	$D_{H_2-H_2O, g}^{ref}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Ref. de presión para la difusión binaria (ordinaria)	$P_g^{ref}$	$10^5$ (Pa)
Ref. de temperatura para la difusión binaria (ordinaria)	$T_g^{ref}$	$308.1$ (°K)
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O, l}$	$3.5 \cdot 10^{-9}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen) (cátodo)	$D_{O_2, K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del oxígeno (Knudsen) (ánodo)	$D_{O_2, K}$	$0$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del hidrógeno (Knudsen) (cátodo)	$D_{H_2, k}$	$0$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del hidrógeno (Knudsen) (ánodo)	$D_{H_2, k}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{H_2O, gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.6
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.4
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{0H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Ref. de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$10^4$ ( $\frac{S}{m}$ )
Conductividad protónica del electrolito	$K_p$	$0$ ( $\frac{S}{m}$ )
Calor específico del grafito	$C_p$	$711$ ( $\frac{J}{Kg \text{°K}}$ )
Conductividad térmica del grafito	$\sigma_t$	$1.59$ ( $\frac{J}{s m \text{°K}}$ )
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	$4181$ ( $\frac{J}{Kg \text{°K}}$ )
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	$2080$ ( $\frac{J}{Kg \text{°K}}$ )

Tabla 9 Valores de los parámetros para la difusora

**Ánodo**

Ancho de la capa	$L_{tot}$	$4 \cdot 10^{-5}$ (m)
Número de volúmenes de control	$NUM_{vc}$	20
Tortuosidad	$\tau$	5
Sección del medio	$S_{vc}$	$1$ ( $m^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O,l}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la catalítica	$\rho_s$	$4000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	$R$	$8.31447$ ( $\frac{J}{\text{°K mol}}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ ( $m^2$ )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión binaria	$D_{H_2-H_2O,g}^{ref}$	$2.82 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Ref. de presión para la difusión binaria (ordinaria)	$P_g^{ref}$	$10^5$ (Pa)
Ref. de temperatura para la difusión binaria (ordinaria)	$T_g^{ref}$	$308.1$ (°K)
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O,l}$	$2.5 \cdot 10^{-11}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del hidrógeno (Knudsen)	$D_{H_2,K}$	$7.853 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua (Knudsen)	$D_{H_2O,gK}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.2
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{0H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Ref. de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Densidad de generación electrónica del cátodo	$A_{act} I_0^{ref}$	$1.2$ ( $\frac{A}{m^2}$ )
Pendiente de Tafel	$B$	0.02 (V)
Referencia de presión del oxígeno en el cátodo	$P_{H_2}^0$	$10^5$ (Pa)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$0$ ( $\frac{S}{m}$ )
Potencial corrector (SP concentración)	$C_1$	1 (V)
Potencial corrector (SP concentración)	$C_3$	1 (V)
Factor corrector (SP concentración)	$C_2$	2.5
Presión de corte para el hidrógeno	$P_{corte}$	65 000 (Pa)
Presión mínima permitida para el hidrógeno	$P_{inf}$	52 000 (Pa)
Corrección de ganancia (SP concentración)	$A$	6
Calor específico del NAFION	$C_p$	$1047$ ( $\frac{J}{Kg \text{°K}}$ )
Conductividad térmica del NAFION	$\sigma_t$	$0.0586$ ( $\frac{J}{s m \text{°K}}$ )
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	$4181$ ( $\frac{J}{Kg \text{°K}}$ )
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	$2080$ ( $\frac{J}{Kg \text{°K}}$ )

Coefficiente de conductividad	$b_{11}$	$0.5139 \left( \frac{1}{\Omega \cdot m} \right)$
Coefficiente de conductividad	$b_{12}$	$0.3260 \left( \frac{1}{\Omega \cdot m} \right)$
Temperatura de ajuste	$b_2$	1268 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Temperatura de ajuste	$t_2$	303 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Coefficiente de solvatación	S	5

Tabla 10 Valores de los parámetros para el ánodo

## Terminales

Ancho de la capa	$L_{tot}$	$4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Temperatura del refrigerante	T	323 ( $^{\circ}\text{K}$ )
Sección del medio	$S_{vc}$	1 ( $\text{m}^2$ )
Masa molecular del agua	$M_{\text{H}_2\text{O}}$	$18 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \right)$
Masa molecular del aire	$M_{\text{aire}}$	$28.85 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \right)$
Densidad de la capa	$\rho_s$	$2000 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$
Presión de oxígeno	presion_o2	100 000 (Pa)
Presión de hidrógeno	presion_h2	100 000 (Pa)
Presión vapor agua	presion_vapor_agua	40 000 (Pa)
Porosidad	$\epsilon_g$	1
Flujo molar de refrigerante	flujo_refrigerante	$5 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$
Calor específico del aire	$Cp_{\text{aire}}$	$1012 \left( \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{K}} \right)$
Calor específico del colector (aluminio)	$Cp_{\text{colector}}$	$897 \left( \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{K}} \right)$
Constante de los gases ideales	R	$8.31447 \left( \frac{\text{J}}{^{\circ}\text{K} \cdot \text{mol}} \right)$
Presión de saturación del agua a $T_0^{\text{sat}}$	$P_{0\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$	3169 (Pa)
Carga de agua de referencia	$K_1$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
Ref. de temperatura para la presión de saturación	$T_0^{\text{sat}}$	298.16 ( $^{\circ}\text{K}$ )

Tabla 11 Valores de los parámetros para los colectores

<b>Membrana</b>		
Ancho de la capa	$L_{tot}$	$8 \cdot 10^{-5}$ (m)
Número de volúmenes de control	$NUM_{vc}$	20
Tortuosidad	$\tau$	1
Sección del medio	$S_{vc}$	1 (m <sup>2</sup> )
Masa molecular del agua	$M_{H_2O}$	$18 \cdot 10^{-3}$ ( $\frac{Kg}{mol}$ )
Densidad del agua	$\rho_{H_2O, l}$	$972$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Densidad de la membrana	$\rho_s$	$2000$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
Constante de los gases ideales	$R$	$8.31447$ ( $\frac{J}{\circ K mol}$ )
Superficie de condensación	$\alpha_v$	$10^{-2}$ (m <sup>2</sup> )
Coefficiente de transferencia	$\beta$	$10^{-3}$ ( $\frac{m}{s}$ )
Coefficiente de difusión del agua líquida	$D_{H_2O, l}$	$5.5 \cdot 10^{-6}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Coefficiente de difusión del vapor de agua	$D_{H_2O, gK}$	$10^{-6}$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
Fracción (porosidad) del electrolito	$\epsilon_e$	0.72
Fracción de poros (porosidad)	$\epsilon_{poros}$	0.4
Fracción (porosidad) de sólido	$\epsilon_s$	0.6
Presión de saturación del agua a $T_0^{sat}$	$P_{H_2O}^{sat}$	3169 (Pa)
Ref de temperatura de la presión de saturación	$T_0^{sat}$	298.16 (°K)
Conductividad electrónica del sólido	$\sigma_e$	$0$ ( $\frac{1}{\Omega m}$ )
Calor específico del NAFION	$C_p$	$1047$ ( $\frac{J}{Kg \circ K}$ )
Conductividad térmica del NAFION	$\sigma_t$	$0.0586$ ( $\frac{J}{s m \circ K}$ )
Calor específico del agua líquida (P = cte)	$C_p$	$4181$ ( $\frac{J}{Kg \circ K}$ )
Calor específico del agua vapor (P = cte)	$C_{pv}$	$2080$ ( $\frac{J}{Kg \circ K}$ )
Coefficiente de conductividad	$b_{11}$	$0.5139$ ( $\frac{1}{\Omega m}$ )
Coefficiente de conductividad	$b_{12}$	$0.3260$ ( $\frac{1}{\Omega m}$ )
Temperatura de ajuste	$b_2$	1268 (°K)
Temperatura de ajuste	$t_2$	303 (°K)
Coefficiente de solvatación	$S$	5

Tabla 12 Valores de los parámetros para la membrana

## 4.3. Análisis del modelo

### 4.3.1. La curva de polarización en función de diversos parámetros

#### 4.3.1.1. Curva de polarización original

Tras ensamblar los modelos y adjudicarles los valores de los parámetros suprascritos, se comienza a analizar los resultados con el ánodo ya implementado. A medida que se incorporan descripciones al modelo, éste se vuelve más completo y menos idealizado, puesto que al ir añadiendo las pérdidas que cada nueva descripción incorpora, se va obteniendo un modelo con menos potencia y rango dinámico.

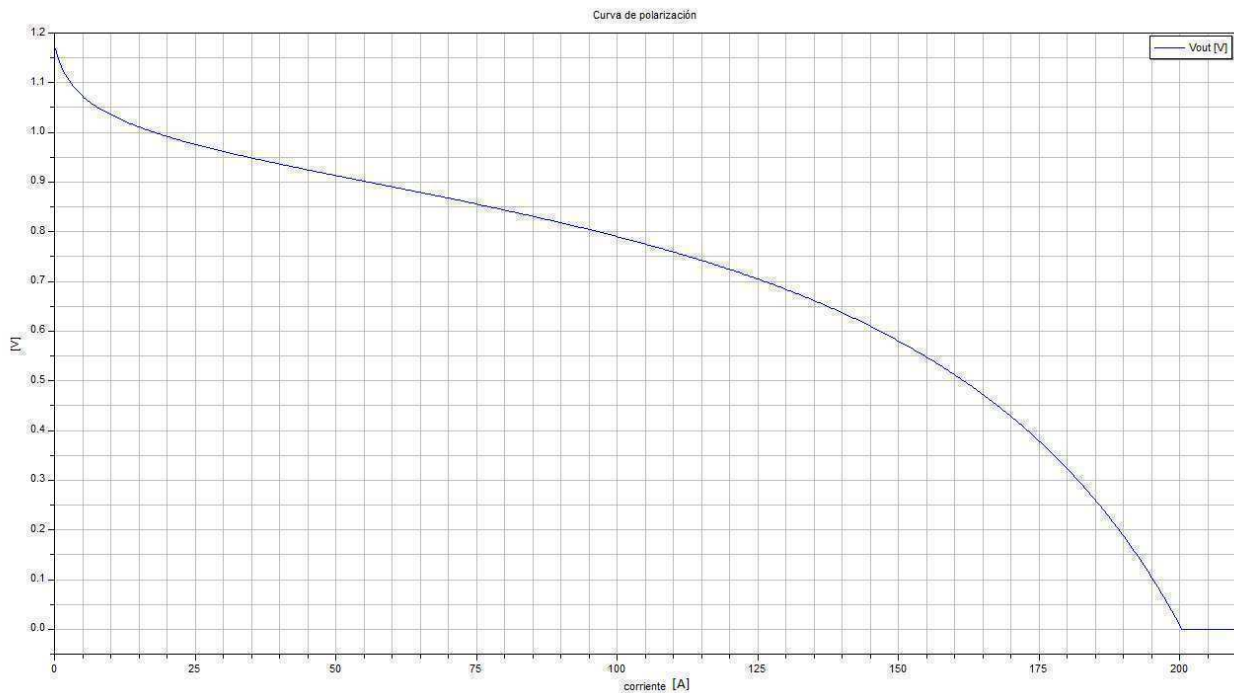


Figura 75 Curva de polarización original

Con el anterior modelo se alcanzaban los 250(A), pero ahora no se llega a los 200(A). Es evidente entonces que también el ánodo es fuente de pérdidas que antes no estaban contempladas y que ahora al modelarlo aparecen. La magnitud de estas pérdidas es bastante menor que la del cátodo y desde luego se puede configurar mediante parámetros. El objetivo de este trabajo es sobre todo el modelado, de modo que aún en el caso de que los parámetros empleados no fuesen rigurosamente exactos, lo importante es que cualitativamente sí lo sean.

La forma en la que funciona el modelo es la misma que en casos anteriores. Previo a la conexión de la carga, se ha puesto en marcha la pila para que adquiriera temperatura y presiones estacionarias. A partir del instante  $t=0$  se conecta la carga y analiza el sistema.

Aparecen las tres regiones, pero de un modo mucho más marcado la región de pérdidas por concentración. Eso se debe especialmente a la caída de la presión ponderada de oxígeno y hidrógeno debido al encharcamiento. Precisamente en lo que se refiere al encharcamiento, la mejor manera de observarlo es mediante la simulación por escalones.

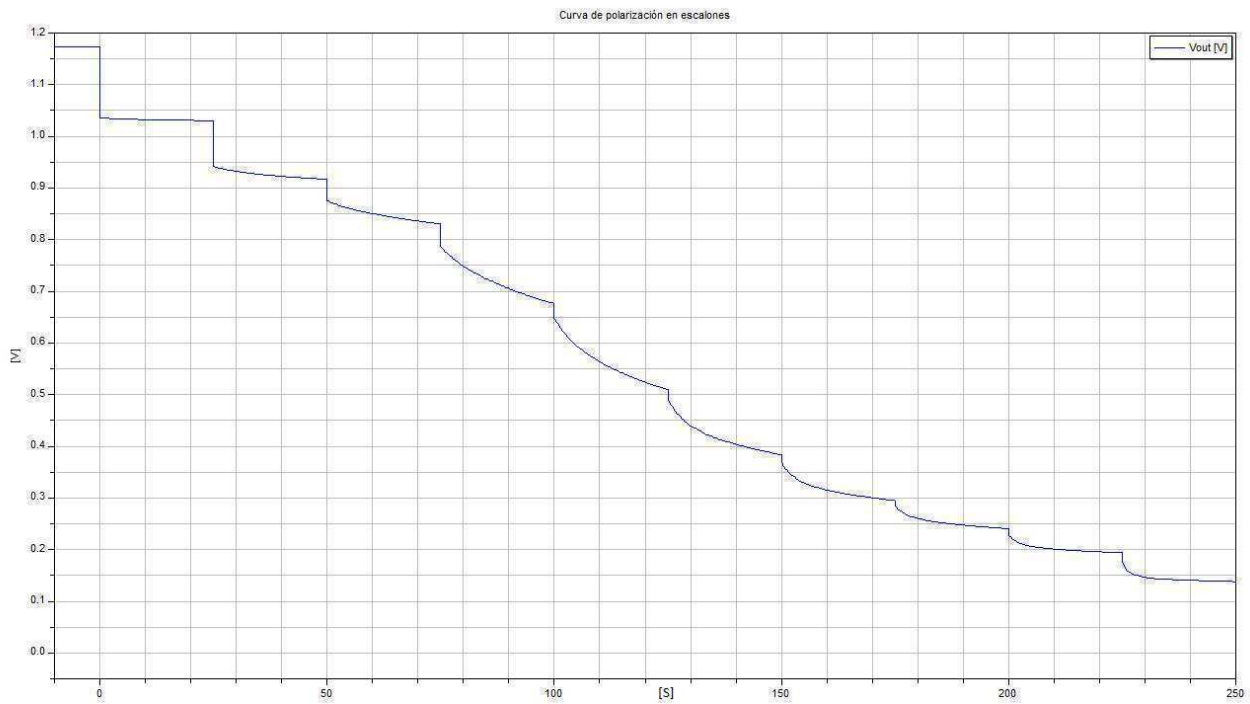


Figura 76 curva de polarización en escalones

Los tiempos negativos son de calentamiento y asentamiento de la pila, con lo que no son interesantes. Aparece después la distorsión en la forma de los escalones fruto del encharcamiento del cátodo, pero por contra el ánodo no se encharca, más bien al contrario tiende a secarse. La evolución de la tensión en escalones es moderadamente lenta, del orden de varias decenas de segundos, puesto que la dinámica de la evolución del agua líquida es también lenta.

Con cargas pequeñas el encharcamiento es menor y por lo tanto la forma de los escalones se altera poco, pero al ir incrementando la carga, todo el agua generada y arrastrada electroosmóticamente se va asentando en el cátodo y por lo tanto se aprecia cómo la tensión se reduce hasta tender hacia el equilibrio, deformando los escalones e indicando el flujo de agua líquida que está entrando en los volúmenes de control del cátodo. Cuando ya no entra más agua líquida la tensión vuelve a reflejar una línea horizontal.

Tal y como están las cosas, los dos sobrepotenciales que contribuyen en mayor medida como principales pérdidas son el sobrepotencial catódico de concentración y el sobrepotencial de activación. El análisis pormenorizado de cada factor se va a ir viendo en las sucesivas subsecciones.

#### 4.3.1.2. Curva de potencia original

Es uno de los datos claves para el diseño de generadores y los resultados de esta subsección son por ende muy importantes.

La forma final de la curva de potencia se puede apreciar en esta figura.



Figura 77 Curva de potencia

La potencia máxima que entregaría una sola célula con estas características serían unos 100(W) con una corriente de unos 151(A). Ése será el PPM de esta célula PEM, y ese es asimismo el punto en el que los reguladores intentan hacer trabajar al sistema.

Se ha vuelto a perder potencia con respecto a los anteriores modelos, y es que los sucesivos detalles que hemos implementados van contribuyendo cada uno en su medida con más y más pérdidas por tal o cual efecto y a resultados de todas ellas, cuantos más fenómenos se describen con este último modelo, mayores son las pérdidas que se contemplan.

Aún así, presenta un excelente rendimiento como generador eléctrico.

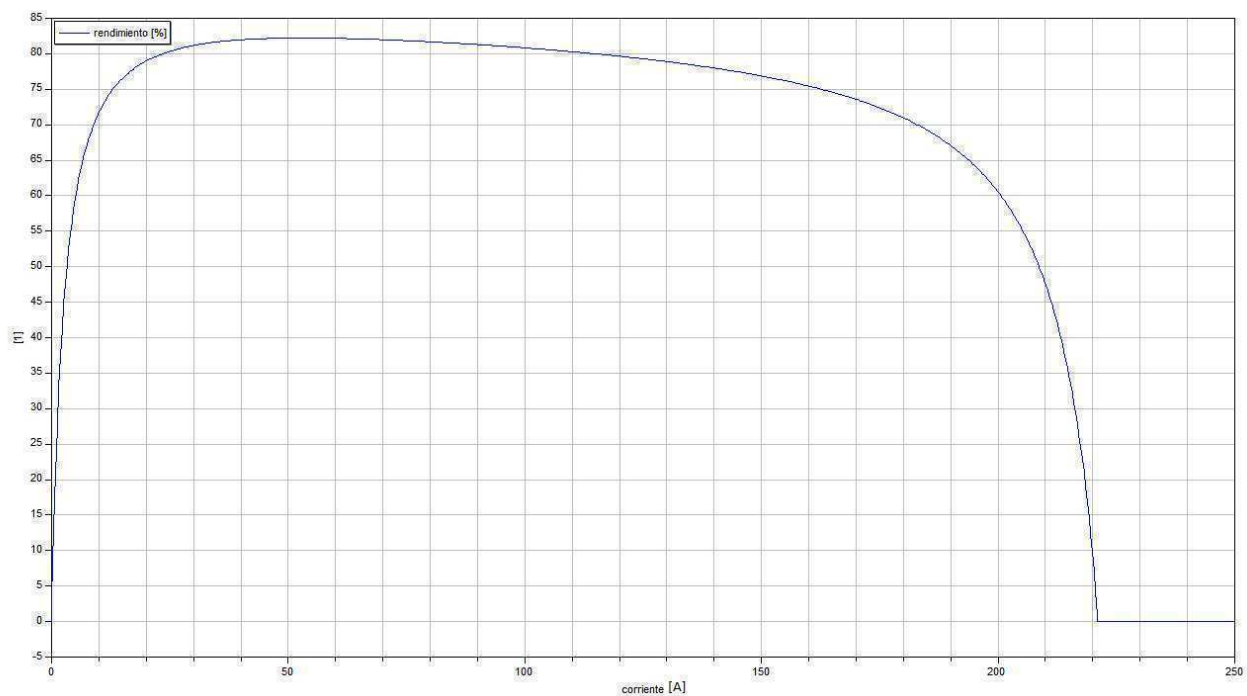


Figura 78 Rendimiento de la pila

En el PPM el rendimiento es superior al 75%. Un rendimiento muy alto significa que no se va a generar una excesiva cantidad de calor en concepto de pérdidas, con lo que el asunto de la disipación se ve considerablemente facilitado.

A partir de ahora comienza el análisis de los parámetros que configuran la célula PEM y de sus repercusiones en los datos que se acaban de ver.

#### 4.3.1.3. Variación en función de la pendiente de Tafel

Las ecuaciones (4.1) ó (2.19) muestran la influencia de este parámetro en el sobrepotencial anódico y catódico.

Dado que el rendimiento del catalizador en la oxidación del hidrógeno es considerablemente mejor que en la reducción del oxígeno, se hace necesario que haya dos valores para estos parámetros, uno para el ánodo y otro para el cátodo. Cuanto mayor sea el valor de la pendiente de Tafel, mayor será el sobrepotencial de activación generado, sucederá entonces que dicha pendiente en el ánodo es menor que en el cátodo. Los valores propuestos son de 0.02(V) para el ánodo y de 0.04(V) para el cátodo. Se comentó en 2.3.1.3. que la horquilla de valores para la pendiente de Tafel anda entre los 20(mV) y los 100(mV). Por lo tanto en lo referente al ánodo el valor es bastante bajo y no se puede reducir mucho más.

El valor de la pendiente de Tafel depende sobre todo del material del catalizador y de la reacción a catalizar. Como la reacción siempre va a ser la misma, el material es el que impone el valor de este parámetro. Se suele usar platino con alguna aleación de paladio u otros componentes, y aunque este parámetro no pueda ser fácilmente cambiado en la práctica, a continuación se va a comprobar cómo influyen las variaciones en su valor.

Se van a cambiar las pendientes en el ánodo y en el cátodo en la misma proporción, obteniendo lo siguiente.

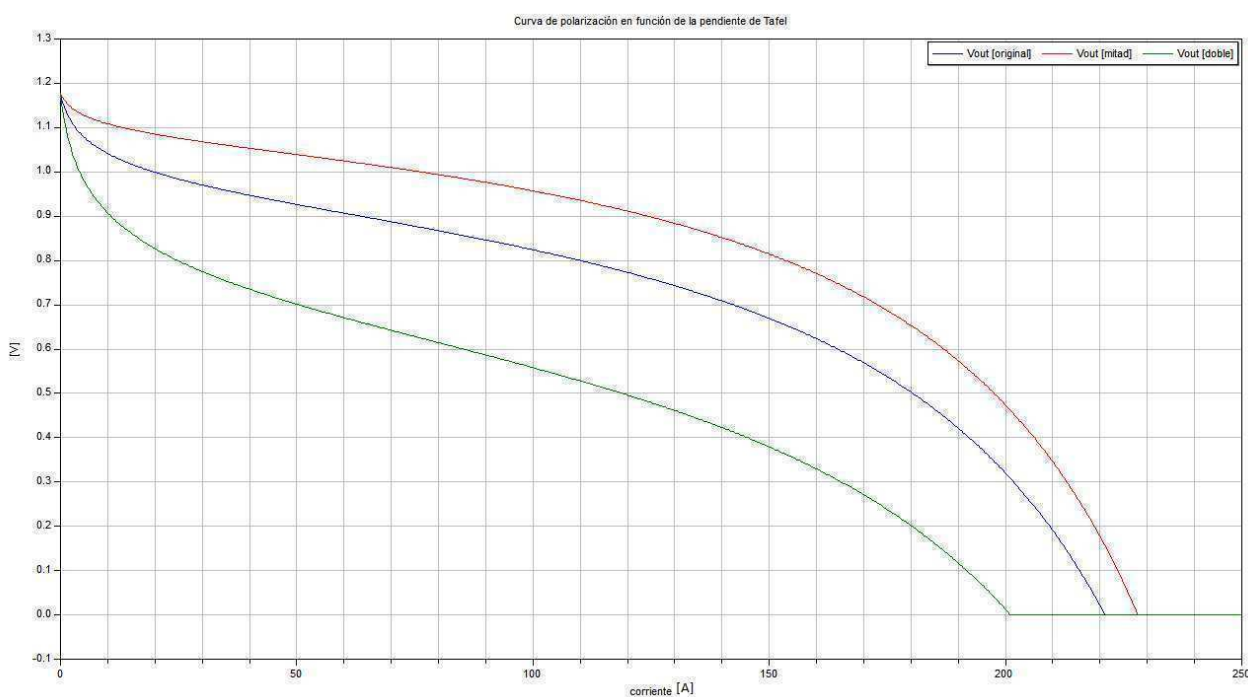


Figura 79 Curva de polarización en función de la pendiente de Tafel

De entre los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

La primera región es en la que se manifiestan en mayor medida los efectos de cambios en este parámetro. Disminuir Tafel equivale a acortar la curva de activación en la primera región, mientras que aumentarlo implica que dicha curva se hace considerablemente más grande y la primera región invade a la segunda. En las regiones segunda y tercera el sobrepotencial de activación aumenta sólo ligeramente con lo que otros son los efectos que pasan a ser dominantes.

En cuanto a la magnitud de las variaciones apréciase que es considerable, siendo que las variaciones en este parámetro disminuyen la potencia y el rango dinámico de la pila.

La conclusión es que este parámetro influye significativamente en la dinámica de la pila y por lo tanto interesan valores lo más bajos posibles para la pendiente de Tafel. Eso es básicamente lo mismo que decir que la correcta elección del material catalizador es un tema trascendental para un óptimo funcionamiento de la pila.

#### 4.3.1.4. Variación en función del área activa-corriente de referencia

Para abreviar, este parámetro se denominará: "densidad de generación". A diferencia de lo que sucedía con la pendiente de Tafel cuyo valor no es fácilmente modificable, la densidad de generación sí que lo es. Su valor depende de la forma en la que el catalizador está disperso por la superficie del ánodo o el cátodo, siendo que cuanto más finamente atomizado y más homogéneamente distribuido, esta densidad de generación será mayor.

Se trata de un parámetro que depende del proceso de fabricación de las capas catalíticas. El rendimiento de la pila puede verse notablemente mejorado o empeorado a resultas de este parámetro, como vamos se comprueba en los siguientes resultados expresados en esta gráfica.

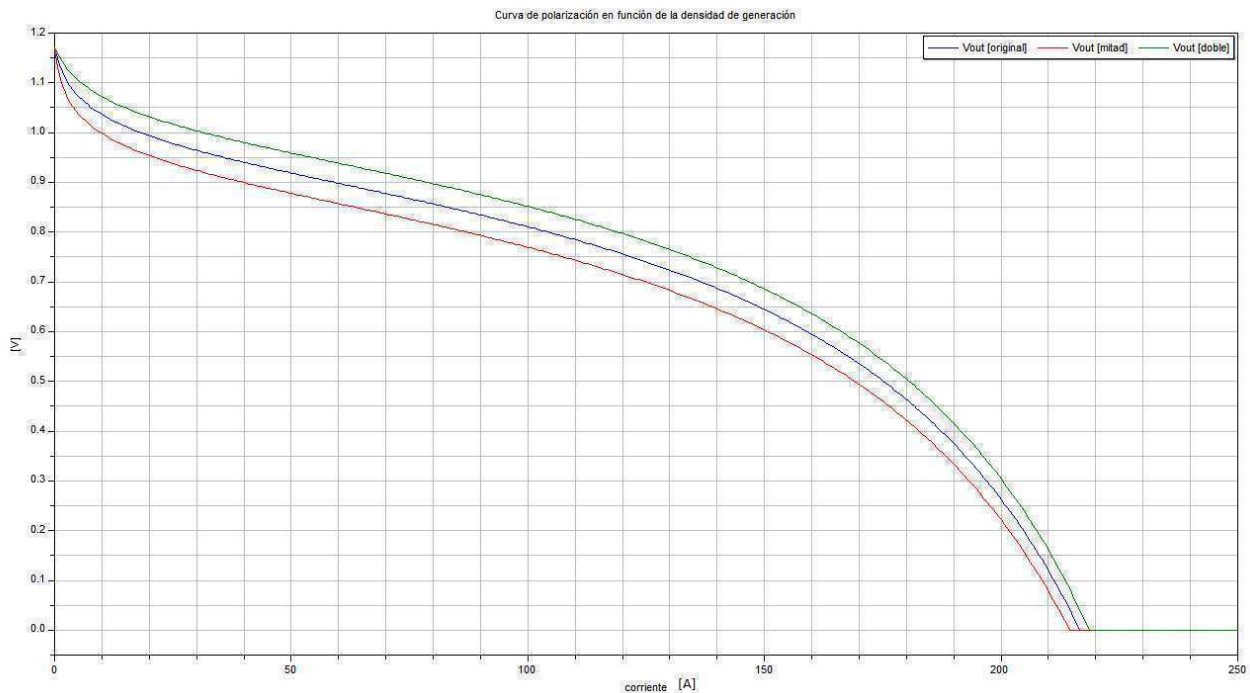


Figura 80 Curva de polarización en función de la densidad de generación:  $A_{act} \rho_{ref}$

Como todos los parámetros que afectan al sobrepotencial de activación regidos por la ley de Butler-Volmer, sus efectos se hacen notar especialmente en la primera región, pero al estar al comienzo sus efectos se hacen notar en todo el rango dinámico.

Según (4.1) ó (2.19) se espera que aumentando la densidad de generación, el sobrepotencial de activación sea menor y por lo tanto la tensión y potencia entregadas por la pila serán mayores. Eso es lo que realmente ocurre, puesto que duplicando la densidad de generación, la primera región de la gráfica se incrementa sensiblemente, y a partir de allí el resto de las regiones (que no varían apenas) tendrán un valor mayor (gráfica verde). Lo contrario ocurre si merma la densidad de generación, haciéndose la primera región más pequeña y de menor magnitud, lo que conlleva que el resto de la gráfica y las otras regiones partan de un valor menor, y como no van a variar apenas, ese resto de la gráfica tendrá un valor menor.

Desde un punto de vista práctico la influencia de este parámetro es bastante importante, con lo que intentar que el proceso de fabricación otorgue los valores más altos posibles para este parámetro es de extraordinaria importancia y desde luego afectará a las tensiones y potencias que pueda entregar el generador.

La convergencia que se produce en la tercera región de la gráfica tiene su explicación. Como corrientes mayores significan más generación de agua líquida y más corriente electrosmótica, el encharcamiento del cátodo para la gráfica verde será mayor, y con ello el sobrepotencial de concentración de oxígeno. Por el contrario la gráfica roja con menores corrientes se encharca menos y dicho sobrepotencial es menor. Entonces en la tercera región el sobrepotencial de concentración actúa en oposición a como lo hace la densidad de generación, a resultas de lo cual cuando una densidad de generación tiende a aumentar la tensión de salida, el sobrepotencial de concentración tiende a disminuirlo.

En resumen, es un parámetro con una notable influencia en las características de la pila, especialmente en lo que se refiere a potencia y tensión, aunque no tanto en el rango dinámico. Este parámetro depende de fabricación, de modo que la elección correcta de los materiales en la fase de diseño es muy importante.

#### 4.3.1.5. Variación en función de la humectación

Es una conclusión casi unánime en todos los textos sobre esta temática, que la membrana y las capas catalíticas deben estar correctamente hidratadas para que la conducción protónica sea la correcta. También es un hecho al visitar las páginas de DuPont [7] y [8] que las necesidades de hidratación de las membranas modernas son cada vez menores o incluso casi nulas. Eso es muy importante por dos motivos.

1. La hidratación de la membrana acaba generando encharcamiento del cátodo en mayor o menor medida, pero es mayor si las corrientes también lo son. Eso aumenta el sobrepotencial de concentración y con ello baja la tensión y rango dinámico de la pila.
2. Cuando la hidratación es crítica o muy importante, la implementación del equipamiento necesario que complete el circuito de humectación y su monitorización, es tecnológicamente costoso o cuanto menos aparatoso. Por consiguiente si se consigue que la hidratación se pueda mantener a niveles bajos y que además la pila no sea sensible a las fluctuaciones que se puedan producir, tendremos considerablemente simplificado el circuito de humectación con los costos que eso representa.

En lo relativo a la hidratación hay que tener en cuenta lo siguiente. Una buena hidratación mejora la conductividad protónica y por ende reduce el sobrepotencial protónico. Por el contrario una buena hidratación genera encharcamiento en el cátodo lo que contribuye al aumento del sobrepotencial de concentración del oxígeno. A continuación se hace un análisis de la variación de la curva de polarización, cuando se varía el nivel de hidratación por medio de la presión de vapor de los gases de alimentación.

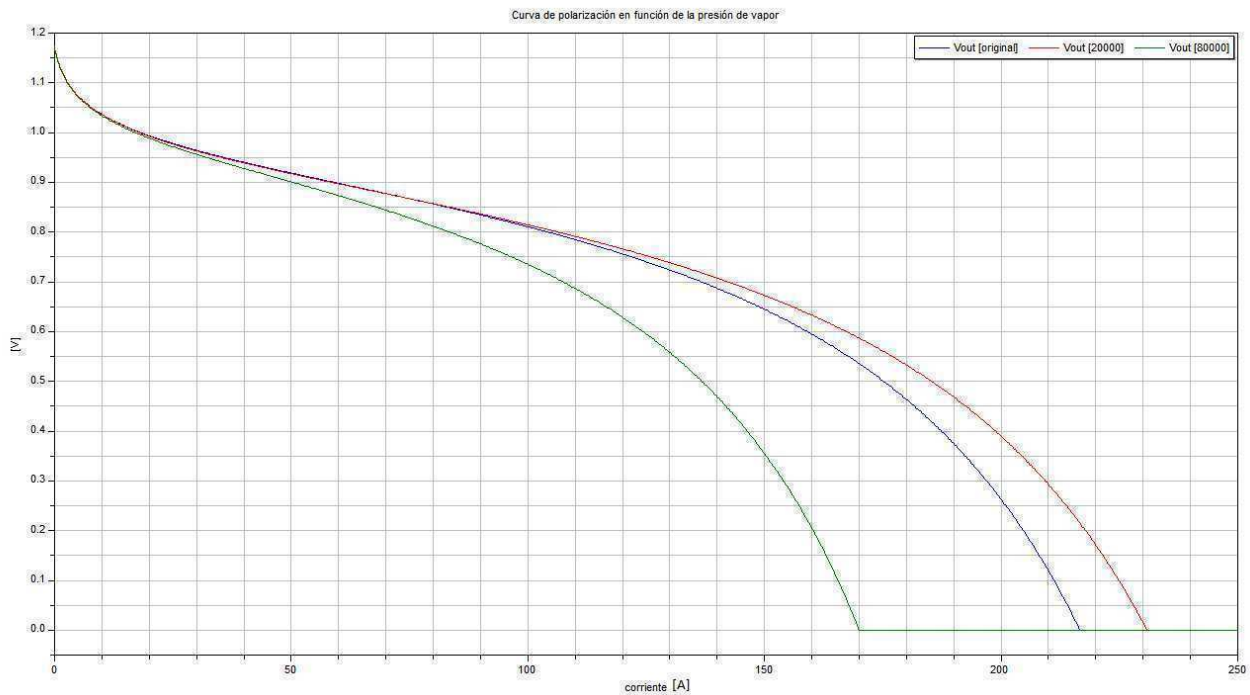


Figura 81 Curva de polarización en función de la hidratación

Es evidente que es mejor que la hidratación sea baja, incluso a costa de una menor conductividad protónica.

La presión de 40000(Pa) original del modelo, está muy cerca de la presión de saturación del agua, y por lo tanto equivale a más del 90% de humedad relativa, eso es bastante alto. Quizá por eso cuando se reduce la hidratación, la curva de polarización mejora mucho, sobre todo en su tercera región. La explicación es que la presión ponderada del oxígeno en el cátodo se ve menguada según (2.21) y el sobrepotencial de concentración de oxígeno aumenta según (2.20), todo ello debido a la mayor carga de agua en el cátodo.

En conclusión, es mejor mantener los niveles de hidratación moderadamente bajos, pese a que la conductividad protónica empeore.

En la siguiente gráfica se muestra la evolución de la tensión empleando una carga fija pero tiempos largos, de esa manera se observan las dinámicas lentas de la pila, como por ejemplo los flujos de agua líquida.

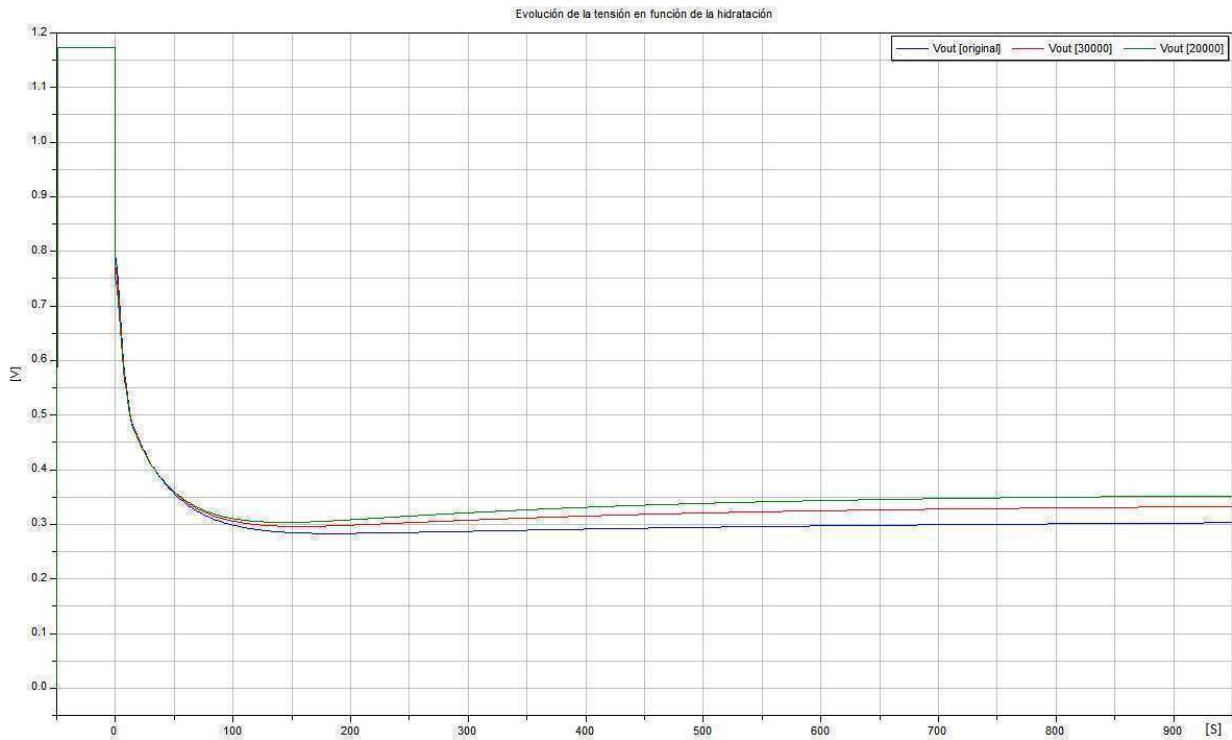


Figura 82 Evolución de la tensión de la pila

Se aprecia la dinámica lenta del agua líquida y la refrigeración en el interior de la pila y también se comprueba que niveles bajos de hidratación en definitiva contribuyen a mejorar los resultados de la pila.

Añadido al efecto de encharcamiento del cátodo, está el secado del ánodo. Niveles bajos de hidratación propician que todo el agua sea arrastrado electrosmóticamente hacia el cátodo y se produzca el secado del ánodo. Eso repercute de forma negativa en el rendimiento y la forma en que dicho efecto ha sido implementado en la pila es la siguiente.

$$P_{xH_2} = \begin{cases} P_{H_2} \sqrt{1 - \chi_{rel}} & \forall \chi_{rel} \geq 0 \\ P_{H_2} \sqrt{1 + \chi_{rel}} & \forall \chi_{rel} < 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

Esa definición discreta de la presión ponderada del hidrógeno en el ánodo, hace que si la carga de agua se tornase negativa (secado), la presión disminuiría y con ello aumentaría el sobrepotencial de concentración de hidrógeno.

La conclusión es que la hidratación es necesaria para una buena conductividad protónica y para evitar el secado del ánodo, pero aún así es mejor que sus niveles sean bajos pues con ello se evita el encharcamiento del cátodo. No nos interesa que se sequen ni el ánodo ni la membrana. Asimismo habrá que estar atento a las evoluciones de DuPont en lo referente a sus materiales de membrana con escasas necesidades de hidratación, lo cual posibilitará el diseño de pilas con un enorme rendimiento.

#### 4.3.1.6. Variación en función de la refrigeración

Tal y como está definido el modelo, se puede analizar la refrigeración desde dos puntos de vista: Variando el flujo de refrigerante o bien variando su temperatura. Claro está que también se pueden combinar ambas, pero este es un ejercicio de análisis.

Estos son los efectos principales de un incremento térmico:

- La presión de saturación del vapor de agua se incrementa.
- Disminuye la humedad relativa y por tanto la hidratación.
- Aumenta la evaporación de agua en las capas.
- Se incrementa la refrigeración por evaporación interior.
- Disminuye la densidad de los gases.
- Aumenta la conductividad protónica.
- En general aumenta la difusividad de los gases.
- Disminuye el potencial de Nernst.
- Mejora la eficacia de los catalizadores.

Debido a que este último efecto no está considerado, parece que en forma global la tensión caerá ante un aumento de la temperatura. Se hace necesario implementar cuanto antes la dependencia de la eficacia de los catalizadores con la temperatura por medio de alguno de los sobrepotenciales.

Continuando con la refrigeración, se va a analizar cómo actúa una variación en la temperatura del refrigerante. Un aumento de la temperatura de la pila debido a una mayor temperatura del refrigerante hace aumentar la tensión de la pila aunque ligerísimamente. El balance de todos los efectos considerados es favorable para la tensión de pila. En las siguientes gráficas apenas se aprecia, pero la gráfica verde se sitúa por encima de las otras dos.

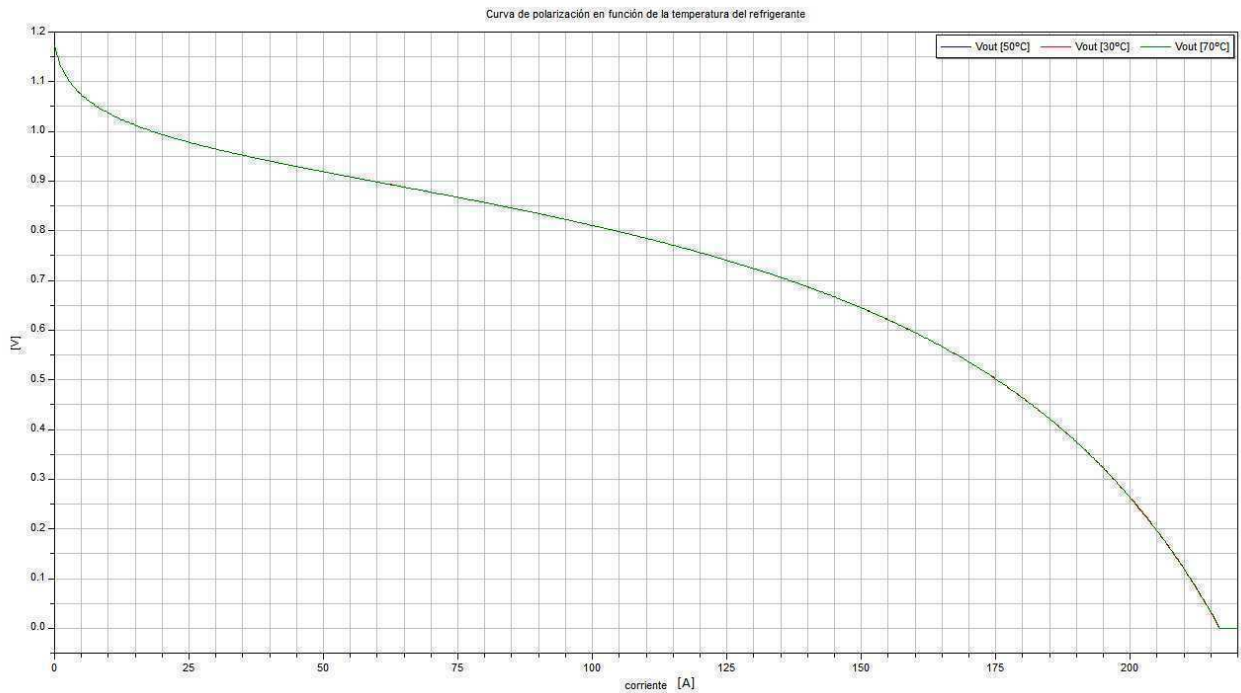


Figura 83 Curva de polarización en función de la refrigeración

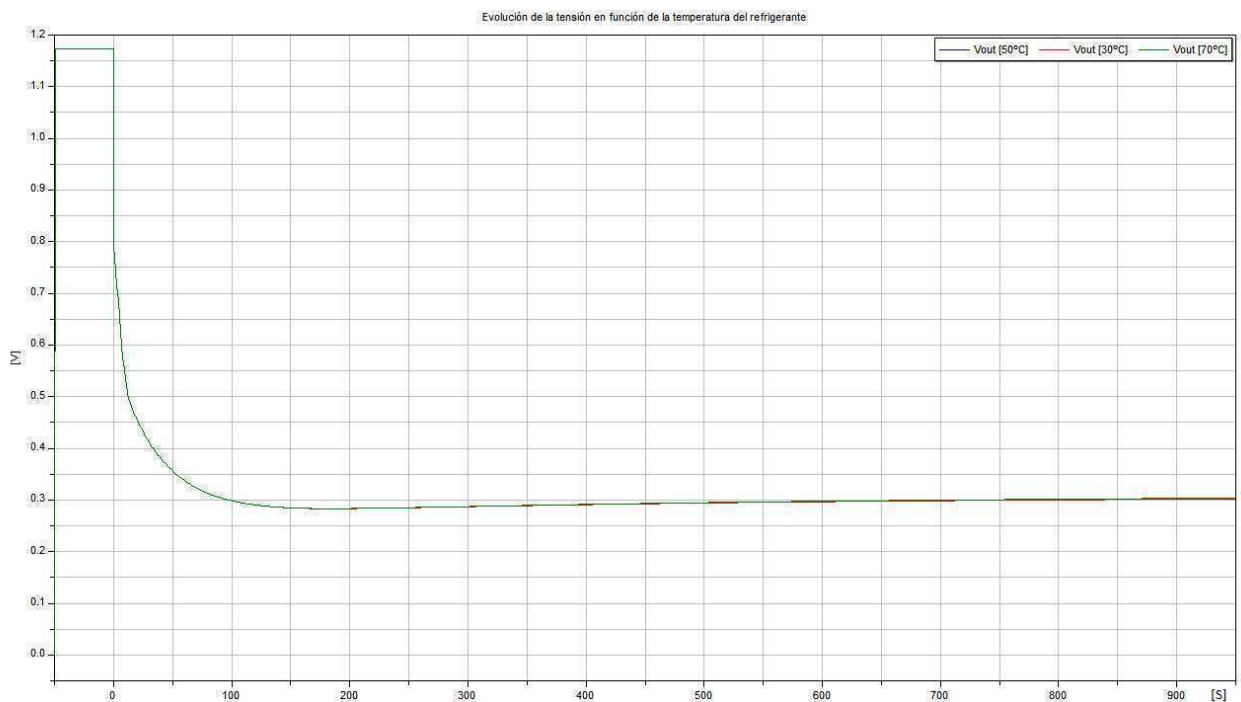


Figura 84 Efecto de la refrigeración con tiempos largos

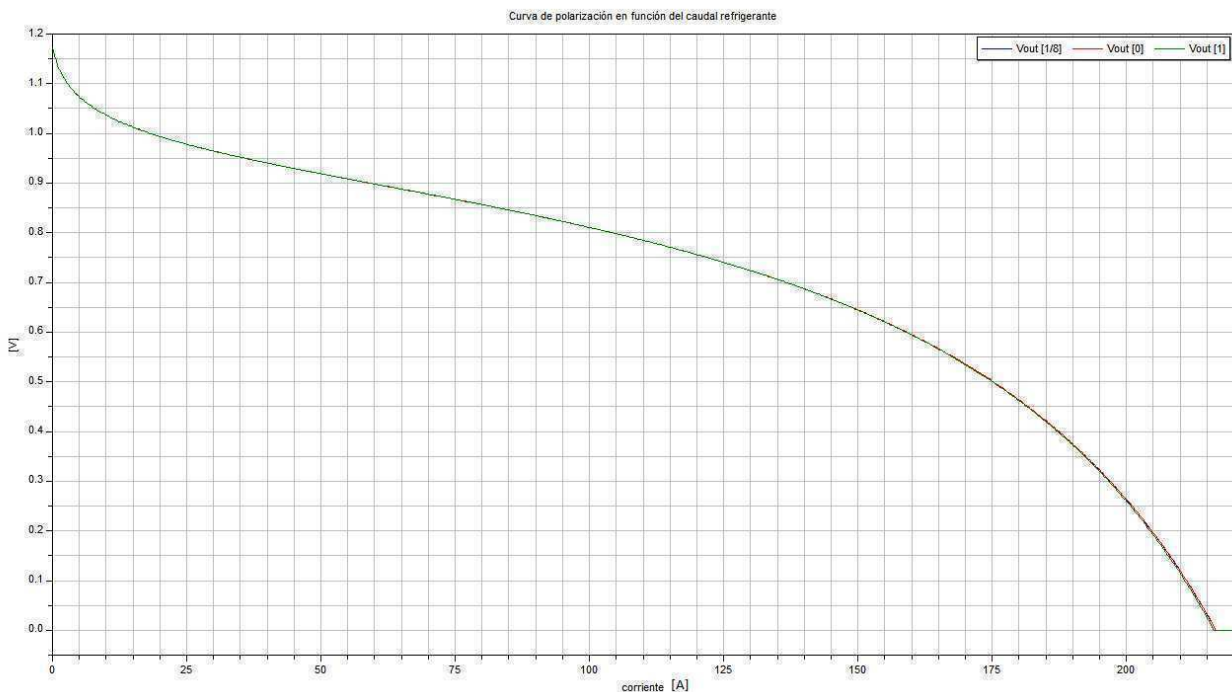
La variación de la tensión de salida en función de la temperatura es muy complicada de describir, puesto que actúan muchos factores de formas opuestas. Sin embargo se pueden sacar algunas conclusiones.

Por el momento y a falta de expresar el rendimiento de los catalizadores en función de la temperatura, el aumento de temperatura mejora aunque muy ligeramente la tensión de pila.

Los tiempos de asentamiento de este efecto son grandes, del orden de varios centenares de segundos. Eso se aprecia en la figura 84 en donde las tres curvas se separan a medida que pasa el tiempo, pero tienden a converger a un valor.

La influencia de la temperatura del refrigerante es tan pequeña que no merece la pena considerar la temperatura del refrigerante como un factor de diseño, y basta tomar el aire atmosférico a la temperatura que sea (dentro de lo normal).

En cuanto al caudal de fluido refrigerante, sirva de aclaración que para el modelo se emplea el flujo molar. Si se quiere entender un poco mejor, se puede decir que a la temperatura de trabajo,  $5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}}\right)$  de aire equivalen de forma aproximada a  $\frac{1}{8} \left(\frac{\text{l}}{\text{s}}\right)$  de aire. Sirva como aclaración para tener una referencia macroscópica más clara.



Hacia el final del rango dinámico se comienzan a separar las tres curvas; más adelante se verá que hay unas dinámicas más lentas que se manifiestan en tiempos mayores y ahora no apreciados. Pareciera como que la influencia de la refrigeración es pequeña, pero de hecho no lo es. Lo cierto es que se necesitan tiempos mayores para apreciar sus efectos. Pero concluyendo, en estas dinámicas de tiempos cortos, no se aprecian apenas los efectos de la refrigeración en la curva característica, siendo que cuanto menos refrigeración más tensión obtenemos.

#### 4.3.1.7. Variación en función de las presiones de los gases

La presión de los gases tiene un efecto notable en la curva de polarización a través de los sobrepotenciales de concentración. Además hay que considerar que ahora hay dos sobrepotenciales de concentración, para el hidrógeno y el oxígeno. Combinados los dos efectos pueden llegar a tener intensidades importantes, pero en este trabajo se van a considerar de manera independiente.

Comenzando por el oxígeno. Su influencia se pone de manifiesto a través de las ecuaciones (2.20) y (2.21), teniendo en cuenta que en el entorno de la presión de trabajo apenas se hace notar. A medida que disminuye su presión progresivamente aumenta el sobrepotencial de concentración de oxígeno, hasta que llegado un punto puede hacerse tan grande que cancele la tensión de Nernst.

El punto de trabajo está fijado en 1(bar), pero puede ser cualquier otro en función de la pila. También hay que tener en cuenta que normalmente el oxígeno no se aplica puro, sino como aire atmosférico. Al menos por el momento no se toman en cuenta esos detalles.

Estos son los resultados con este modelo si se varía la presión de oxígeno.

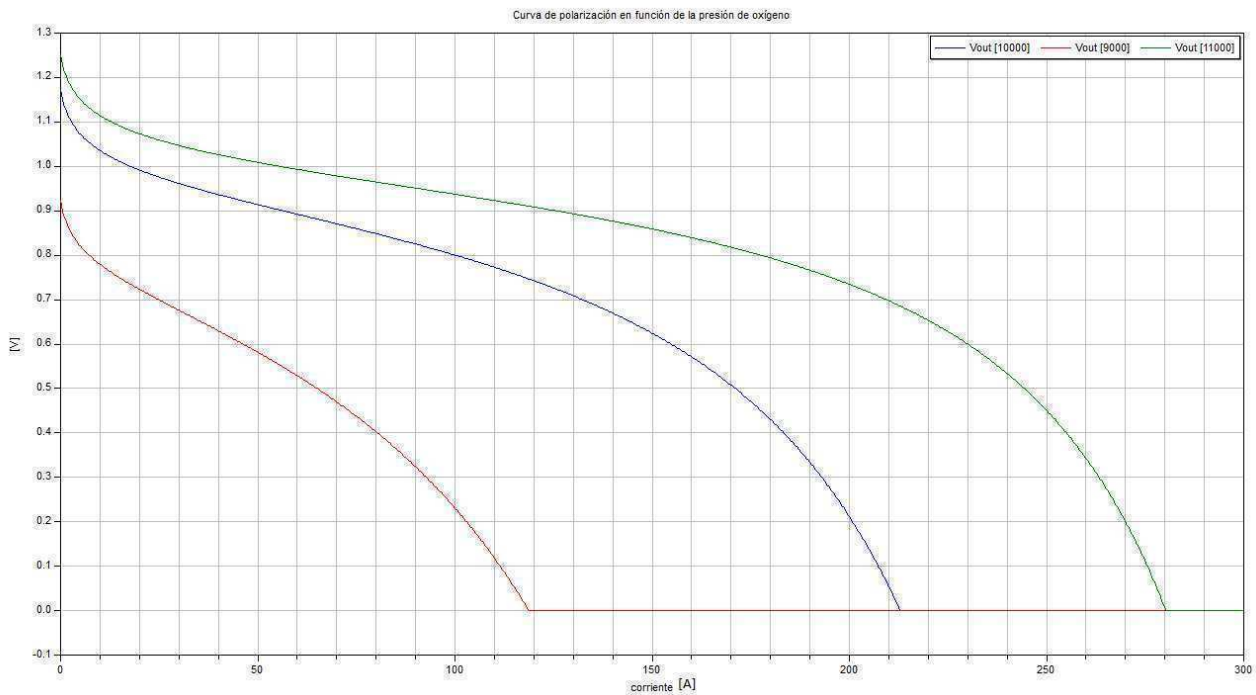


Figura 85 Curva de polarización en función de la presión de oxígeno

Los resultados coinciden cualitativamente con lo que se sabía hasta ahora, pero con mayor intensidad, debido a que hay más factores de pérdidas considerados.

Se aprecia que varían la amplitud y el rango dinámico de las curvas, pero las proporciones de la primera región permanecen constantes, dicho de otro modo, el sobrepotencial de concentración se incrementa además de por efecto de la merma de presión, por el incremento de la carga de agua en el cátodo lo que hace que la presión ponderada se reduzca. Entonces es normal que a corrientes elevadas el sobrepotencial de concentración aumente. A resultados de lo comentado, la tercera región puede variar mucho de tamaño en función de la presión y la corriente, con lo que invade a la segunda región y el rango dinámico disminuye. A bajas corrientes lo que se aprecia es el valor absoluto del potencial desde donde arranca la gráfica.

Pasando ahora al ánodo, en este caso cuando la corriente aumenta tiende a secarse, por lo tanto el encharcamiento no va a ser un problema.

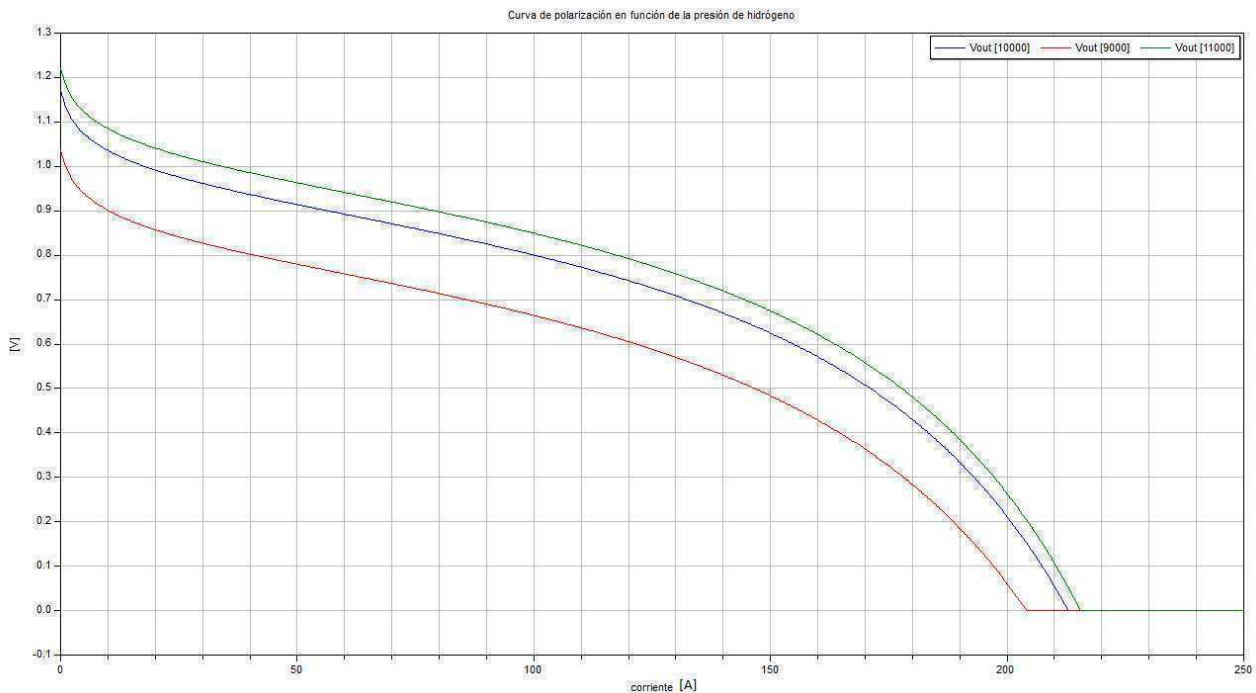


Figura 86 Curva de polarización en función de la presión de hidrógeno

En este caso las tres gráficas tienen las mismas proporciones, lo que significa que el sobrepotencial de hidrógeno actúa por igual al margen de la intensidad de corriente. Depende pues casi únicamente de la presión. Eso confirma que la presión normal y la presión ponderada se mantienen constantes, o lo que es lo mismo, que la carga de agua en el ánodo permanece constante, o a lo sumo disminuye. La tercera región o región de pérdidas de concentración, es debida al encharcamiento del cátodo, de ahí que la gráfica roja con corrientes menores tenga un poco menores estas pérdidas, pero por el contrario la gráfica verde las tiene algo mayores. A raíz de todo eso las tres gráficas parecen converger ligeramente en la tercera región.

A bajas corrientes en el comienzo de la gráfica, la diferencia de nivel entre ellas es debida tan sólo a la presión absoluta de hidrógeno de modo similar a como pasa con el oxígeno pero en mucha menor medida.

En resumen, la reducción de la presión de hidrógeno reduce tanto la intensidad de salida como el margen dinámico de la pila, pero en mucha menor medida que con el oxígeno. Eso es debido a que las ecuaciones del sobrepotencial de concentración de hidrógeno (4.2) y (4.3) calculan la presión ponderada con raíz cuadrada, y eso lo hace más suave. Además no existen problemas de encharcamiento sino más bien al contrario.

Globalmente el valor de las presiones de los gases es un factor muy importante a tener en cuenta en el diseño de las pilas, puesto que parece tener una influencia notoria en el comportamiento de esta, muy especialmente en lo que respecta a la presión de oxígeno. Sin embargo el control barato, preciso y eficiente de la presión de un gas es un tema tecnológicamente sencillo que no debería suponer un obstáculo.

Surge ahora la idea de que a presiones mayores rendimientos mayores. Esa idea desde luego es bastante tentadora tanto desde el enfoque de los sobrepotenciales de concentración, como desde la perspectiva de que a mayores presiones el agua puede permanecer líquida a temperaturas mayores y por lo tanto se podría llegar a superar la barrera de los cien grados centígrados, conservando el agua líquida. El reto en este caso es la durabilidad de la pila que se ve comprometida.

### 4.3.2. Encharcamiento y secado en función de diversos parámetros

#### 4.3.2.1. Encharcamiento original

Este tema ha ido cobrando importancia a medida que se han ido incorporando fenómenos al modelo. Además ha resultado que el fenómeno del encharcamiento del cátodo se complementa con el del secado del ánodo, y son factores a tener en cuenta puesto que reducen el rango dinámico y condicionan el punto de trabajo de la pila. A partir de los resultados que se muestran a continuación, se pueden deducir importantes conclusiones en cuanto a la mejor elección del punto de trabajo de la pila con vistas a un mejor rendimiento y prestaciones de la pila.

Para hacer este análisis se aplica como en anteriores ocasiones, un tipo de polarización en escalones, donde se pone de manifiesto muy claramente el encharcamiento de la pila a través de la deformación de los escalones de la curva.

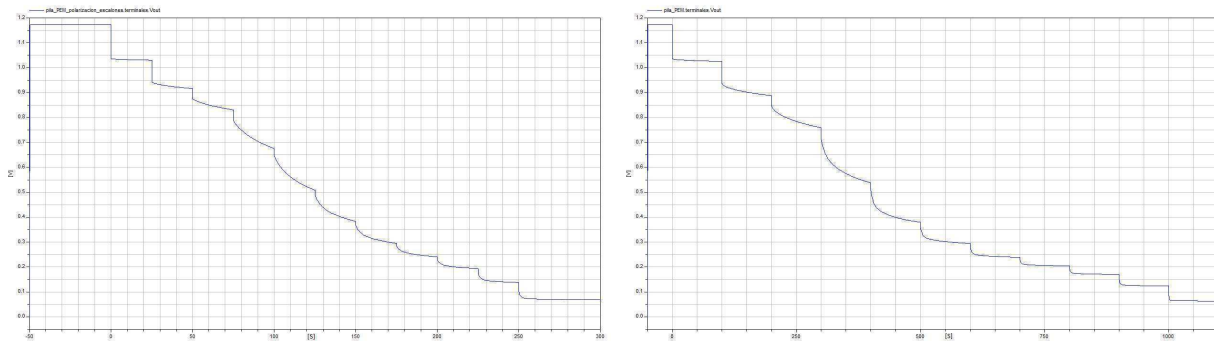


Figura 87 Polarización en escalones de la pila

Se aprecia cómo la pila sufre mucho los efectos del encharcamiento sobre todo en el centro de su rango dinámico, eso se muestra como deformaciones de los escalones. Considerando eso, se debe evitar que la pila trabaje en esa zona, y si tal y como ha sido visto en 4.3.1.2. el PPM está sobre los 151(A), la pila debería trabajar en él con no demasiados problemas pero siempre intentando trabajar desde el PPM hacia arriba y no hacia abajo.

En lo que se refiere al encharcamiento de las capas catalíticas, a continuación se muestra lo que se comentó al comienzo de esta subsección.

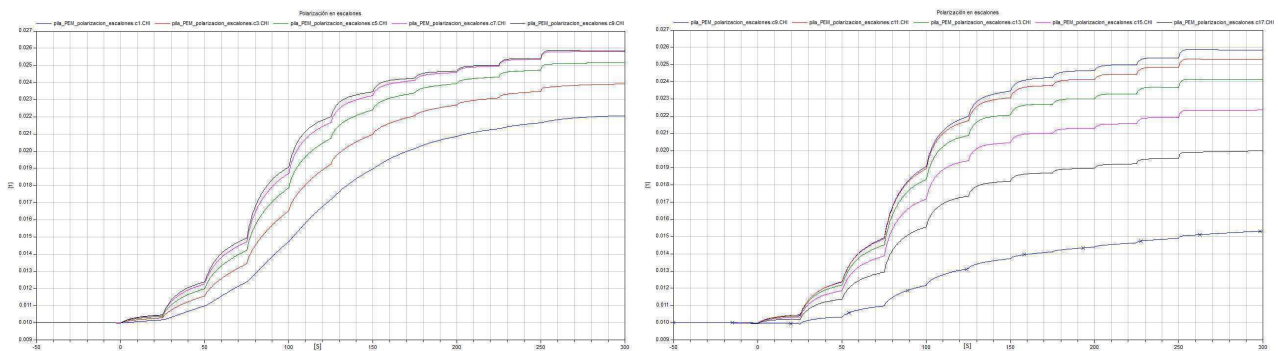


Figura 88 Encharcamiento del cátodo

En este caso el máximo se encuentra en el noveno volumen de control, con lo que se ha desplazado hacia el ánodo con respecto a los anteriores modelos. La explicación podría ser debida al mayor flujo de agua y a un mejor drenaje de la capa difusora. Además los niveles de encharcamiento son los mayores hasta ahora y están fuertemente vinculados a la corriente, sin duda por el efecto electroosmótico. Es además ese alto nivel de encharcamiento el responsable de la merma en la presión ponderada de oxígeno, y el defecto de masa que conlleva.

En el lado opuesto está el ánodo con los siguientes resultados.

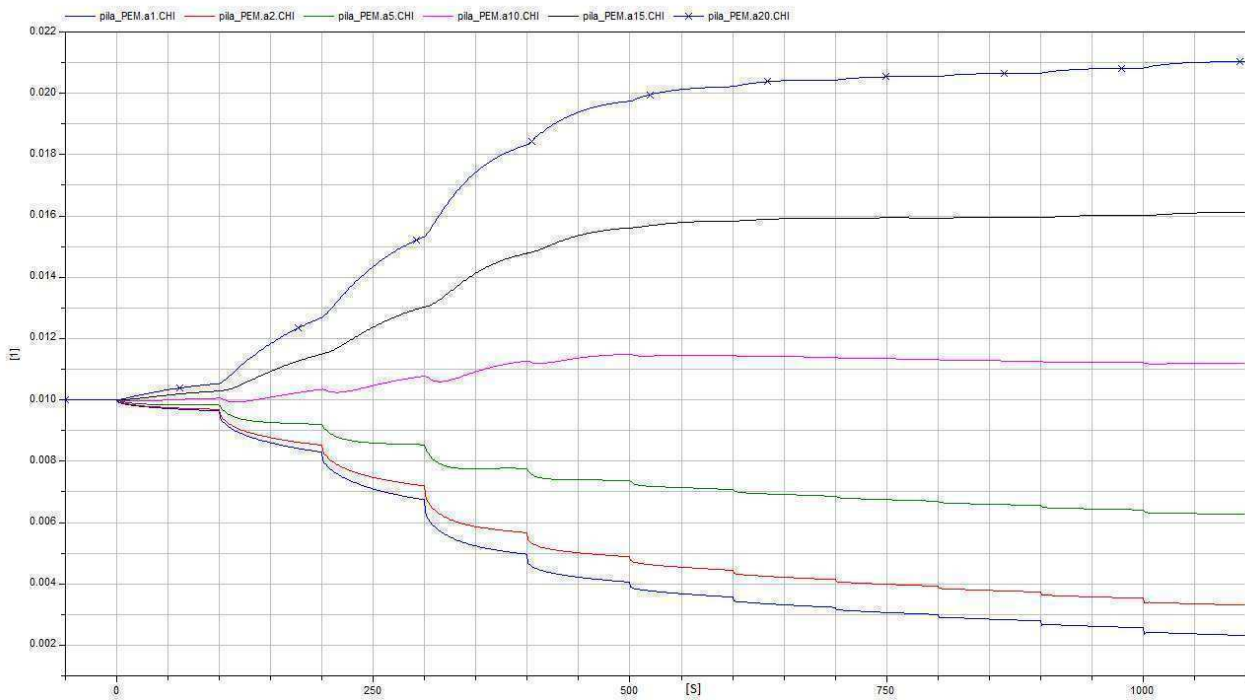


Figura 89 Encharcamiento del ánodo

Los primeros volúmenes de control que son los más cercanos a la capa difusora y opuestos al cátodo, sufren especialmente el efecto de secado. Véase la gráfica azul, frontera del ánodo, que llega casi a secarse por completo. Prácticamente media capa anódica tiende a secarse, concretamente la opuesta al cátodo. Por el contrario la otra media capa recibe el agua arrastrada desde las anteriores y curiosamente se encharca. El resultado es que el ánodo en efecto se seca parcialmente, pero su zona más próxima a la membrana tiende a encharcarse. En cierto modo se comporta como una bomba de agua líquida que impulsa el agua que proviene de la difusora hacia la membrana. En el proceso la parte contigua a la difusora se seca y la contigua a la membrana se encharca.

Además inyecta toda esa agua líquida en la membrana favoreciendo que la carga de agua se duplique, lo que la hidrata bastante. Ese exceso de carga de agua se transmite a lo largo de la membrana, apareciendo en el cátodo como la gráfica azul de la figura 88, que es el umbral de encharcamiento del cátodo. Hay que recordar que en el cátodo además del agua difundida en formas líquida o gaseosa, está presente el agua que se genera como reacción electroquímica en forma de vapor y que también se condensa.

La separación de las gráficas de carga de agua depende del valor del coeficiente de difusión del agua líquida, de la misma manera que en una gran tubería no se producen caídas de presión, y por el contrario en una pequeña sí; resulta que a lo largo de la membrana la carga de agua es prácticamente constante y en las capas catalíticas dichas caídas son fácilmente apreciables.

Las conclusiones principales de los resultados vistos son:

- El cátodo siempre se encharca.
- La membrana aumenta su carga de agua en función de la corriente de pila.
- Al lo largo de la membrana su carga de agua es casi constante.
- El ánodo se seca pero sólo parcialmente.
- El encharcamiento aún siendo alto, está en niveles aceptables.

Eso es todo en cuanto al encharcamiento. Existe una pequeña inconsistencia en el ánodo y consiste en que está planteado como de corriente anódica constante y debía haber sido variable, en forma similar al funcionamiento del cátodo pero a la inversa. Debería presentar su máximo de corriente protónica en la frontera con la membrana, e irse reduciendo hasta llegar a cero en la frontera con la difusora. Las pruebas hechas con un modelo tal, no arrojan un comportamiento radicalmente distinto.

#### 4.3.2.2. Variación en función del coeficiente de solvatación del hidrógeno

Supuestamente este valor no es posible cambiarlo, y se trataría de un parámetro intrínseco al NAFION. Este análisis sirve tan sólo para apreciar la influencia del mencionado parámetro en el movimiento de agua en el interior de la pila. Es en todo caso competencia del fabricante diseñar membranas que tengan una menor necesidad de agua y con ello un menor coeficiente de solvatación efectivo.

El coeficiente de solvatación es el responsable de la corriente de agua electrosmótica desde el ánodo al cátodo según la ecuación (3.13), de modo que cuanto mayor sea aquel mayor será dicha corriente. Lo que se espera de este coeficiente es que si aumenta, aumente también el encharcamiento del cátodo, además de que se drenen en mayor medida las capas secas (frontera con la difusora) del ánodo.

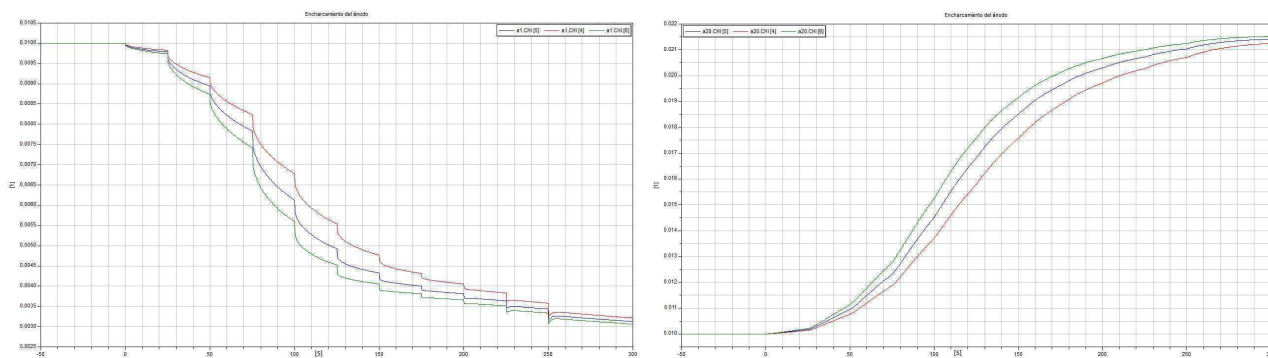


Figura 90 Variación del encharcamiento de las fronteras del ánodo en función del coeficiente de solvatación

Apréciase que en efecto, aumentar el coeficiente seca la frontera del ánodo con la difusora y encharca la frontera del ánodo con la membrana. Todo eso es debido al incremento del flujo electroosmótico de agua líquida. En cuanto al cátodo, todo él sufrirá un aumento del encharcamiento.

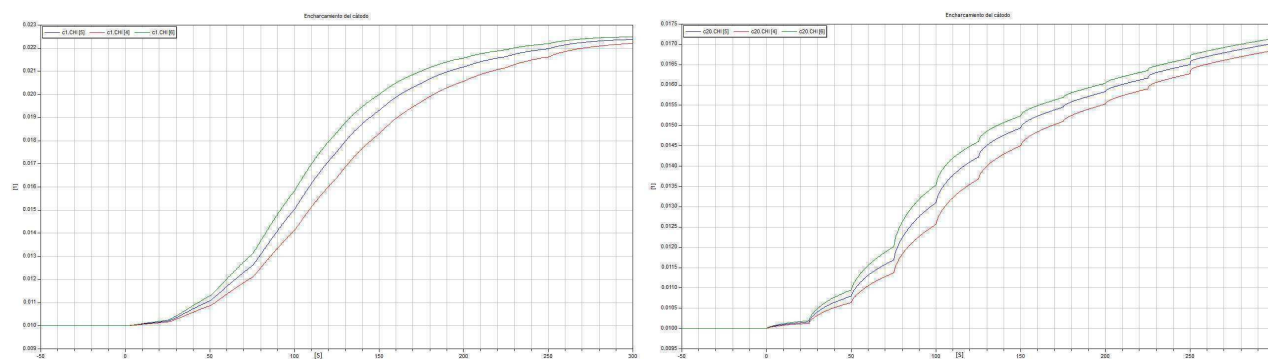


Figura 91 Variación del encharcamiento de las fronteras del cátodo en función del coeficiente de solvatación

Lo cual efectivamente se cumple. Huelga decir que la reducción del coeficiente de solvatación, tiene el efecto contrario a los mencionados.

Como está sucediendo en las otras simulaciones, la zona donde las variaciones en la carga de agua es la correspondiente al centro del rango dinámico. Eso nuevamente aconseja evitar esa zona en lo posible, lo cual además se ve reforzado por el hecho de que el PPM está ligeramente alto (151(A)), manteniendo el punto de operación de la pila, en lo posible sobre o encima de él.

La influencia de este parámetro es relevante en el funcionamiento de la pila, pudiendo llegar a tener pérdidas o mejoras apreciables en torno al 10% o incluso mayores, concluyendo pues que es sumamente interesante que este coeficiente sea cuanto más bajo mejor, o dicho de otro modo, que los diseñadores de la membrana consigan que la corriente electroosmótica a su través sea lo menor posible, haciendo que la dependencia del NAFION con respecto al agua líquida sea menor.

#### 4.3.2.3. Variación en función de la humectación

La humedad relativa de los gases de alimentación es el factor humectador de la pila. Dado que cierto nivel de hidratación es necesario para una buena conducción protónica, en esta subsección se comprueba hasta qué punto esto va a ser así.

Para empezar hay que tener en cuenta que la hidratación en los colectores se regula mediante la presión de vapor de agua, siendo que ésta se transforma en una cierta cantidad de agua líquida mediante (4.8) y (4.9). También se debe hacer notar, que la presión relativa de vapor varía con la temperatura del colector mediante (2.9) y (2.10), concluyendo que es de esperar el que la humedad relativa ( $\alpha$ ) disminuya al aumentar la temperatura por ser la presión de vapor constante. Esa disminución en la presión relativa favorece una mayor evaporación y por lo tanto la carga de agua será menor como expresan (4.8) y (4.9).

Aparecen ahora dos factores opuestos:

- Para que la conducción protónica sea mejor, es necesario unos mayores niveles de hidratación en la membrana y por lo tanto mayores niveles de humectación en el colector.
- Para que el encharcamiento y con ello el defecto de masa sea menor, interesa que los niveles de hidratación sean lo más bajos posible para favorecer el paso por difusión de las especies gaseosas.

En las siguientes simulaciones se analiza cuál de las dos anteriores tiene una mayor relevancia y por lo tanto prever el correcto nivel de hidratación para la pila. Hay que recordar de la sección anterior, que no interesaba que la humedad relativa bajase por debajo del 12%, por lo tanto interesaba mantenerla tan baja como fuese posible pero nunca por debajo de dicho  $\alpha$ . Esa humedad relativa se corresponde a aproximadamente unos 5000(Pa) de presión de vapor de agua.

En este modelo además dependerá de la temperatura de los colectores, pero rondará dicha cantidad.

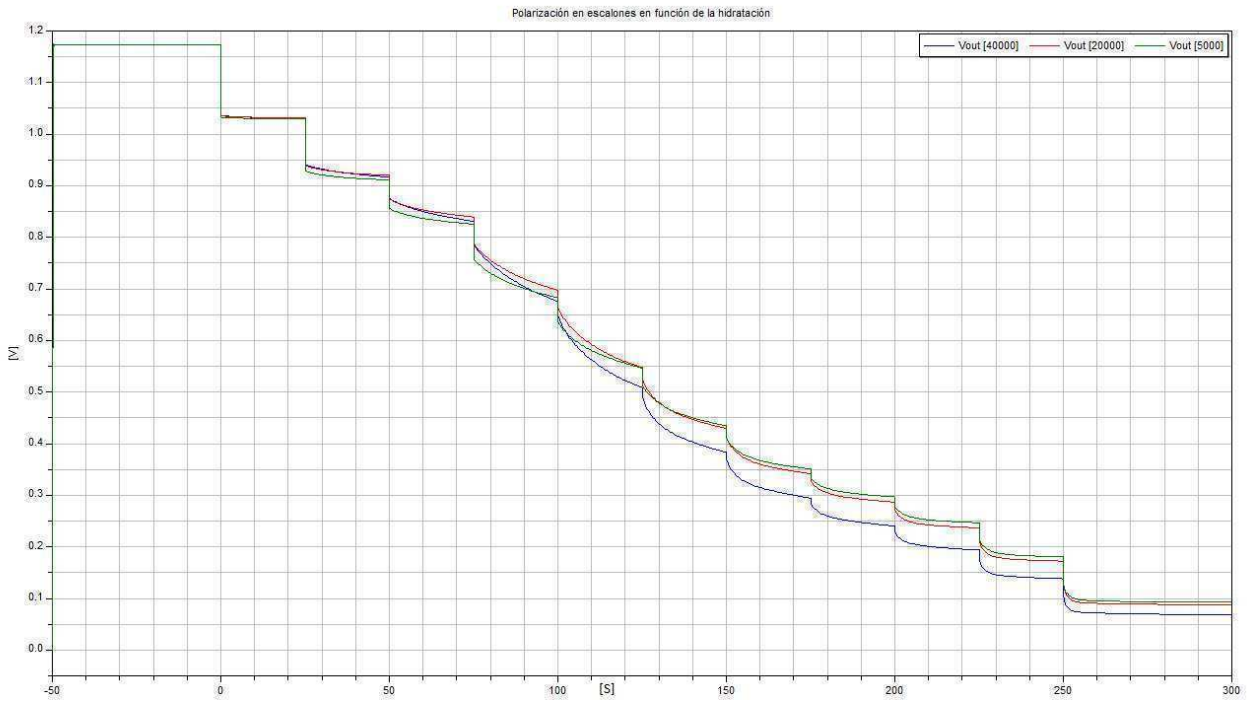


Figura 92 Polarización en escalones en función de la presión de vapor

A medida que baja la hidratación desde casi el 100% de humedad relativa (curva azul) hasta el 12% (curva verde), la respuesta de la pila va mejorando. También es cierto que las deformaciones de la curva verde son menores por haber menor cantidad de agua en el interior.

Si se baja por debajo del 12% de humedad relativa la respuesta empeora y comienzan las pérdidas. Éstas vendrán por dos efectos, la disminución de la conductividad protónica de la membrana y el secado del ánodo.

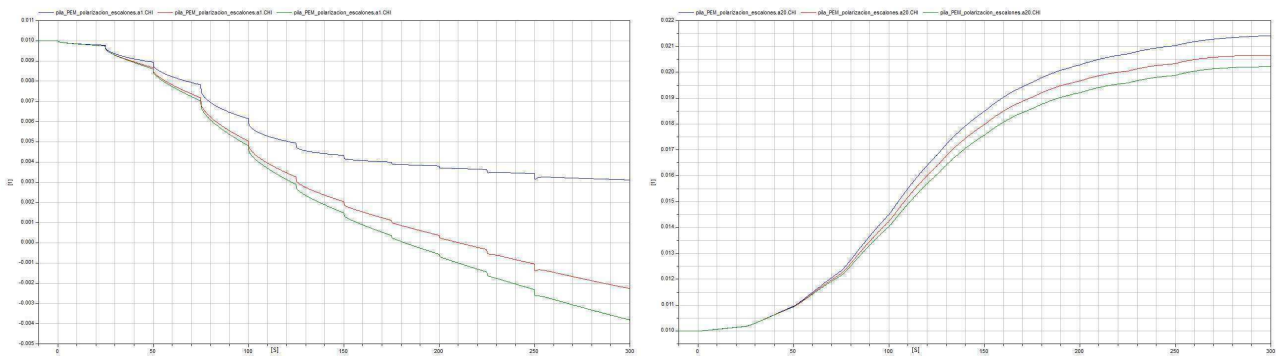


Figura 93 Variación de la carga de agua en las fronteras del ánodo

Se aprecia una clara disminución en la carga de agua en ambas fronteras del ánodo, siendo considerable en la frontera con la difusora (figura 93 izquierda). Además la presión de vapor de agua se reduce en toda la pila, lo que combinado produce como se verá, una considerable reducción de la conductividad protónica.

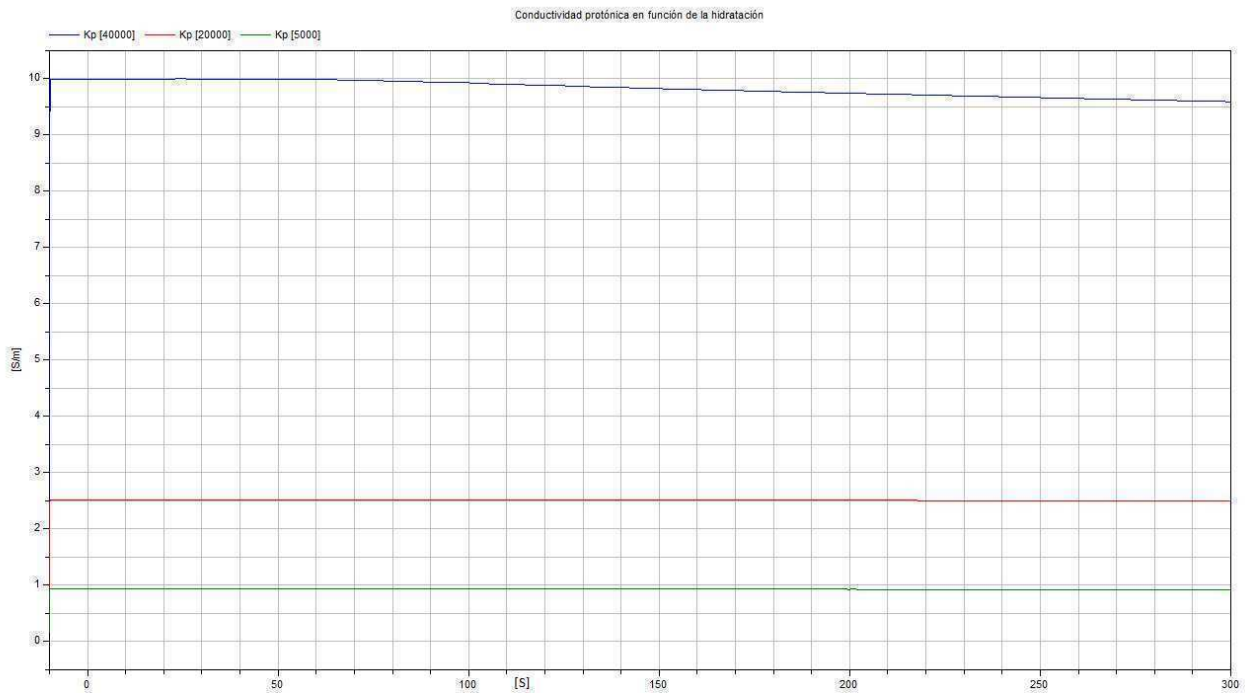


Figura 94 Conductividad protónica de la membrana en función de la presión de vapor

En conclusión, cabe decir que la hidratación es un factor importante de diseño, pero que por suerte no es crítico y permite tener fluctuaciones grandes en su valor sin que esto se muestre de forma decisiva en la característica de salida. En todo caso parece que la mejor decisión a tomar es mantener la hidratación a niveles bajos pero siempre respetando el límite inferior del 12% de humedad relativa (aproximadamente 5000(Pa) de presión de vapor), punto a partir del cual se tendrían pérdidas importantes. Por ejemplo, una humedad relativa del 20 ó 25% sería un buen valor, pues mantiene poca carga de agua en la pila a la par que su característica de salida sigue siendo buena, mejor incluso que con mayores niveles de hidratación.

Es también importante controlar la temperatura para evitar que la evaporación seque la pila y regresen las pérdidas.

#### 4.3.2.4. Variación en función de la refrigeración

El aumento en la temperatura hace disminuir la carga de agua en los colectores además de contribuir a la evaporación del agua líquida en el interior de la pila. Por lo tanto es un factor muy importante a tener en cuenta ya que todo el correcto funcionamiento de la pila depende de esto. La temperatura correcta de funcionamiento ronda los 80°C, a mayores temperaturas podrían presentarse problemas de sequedad y descomposición de los materiales de la membrana. Afortunadamente el control de la temperatura es uno de los eventos tecnológicamente más sencillos, de modo que no será problema la implementación de un sistema de control de la temperatura mediante la regulación del caudal de refrigeración.

Anteriormente se ha visto que es mucho más efectivo y simple refrigerar mediante caudal variable que mediante temperatura variable, de modo que a continuación se analiza cómo evoluciona la pila en tiempos largos con distintos caudales y cargas.

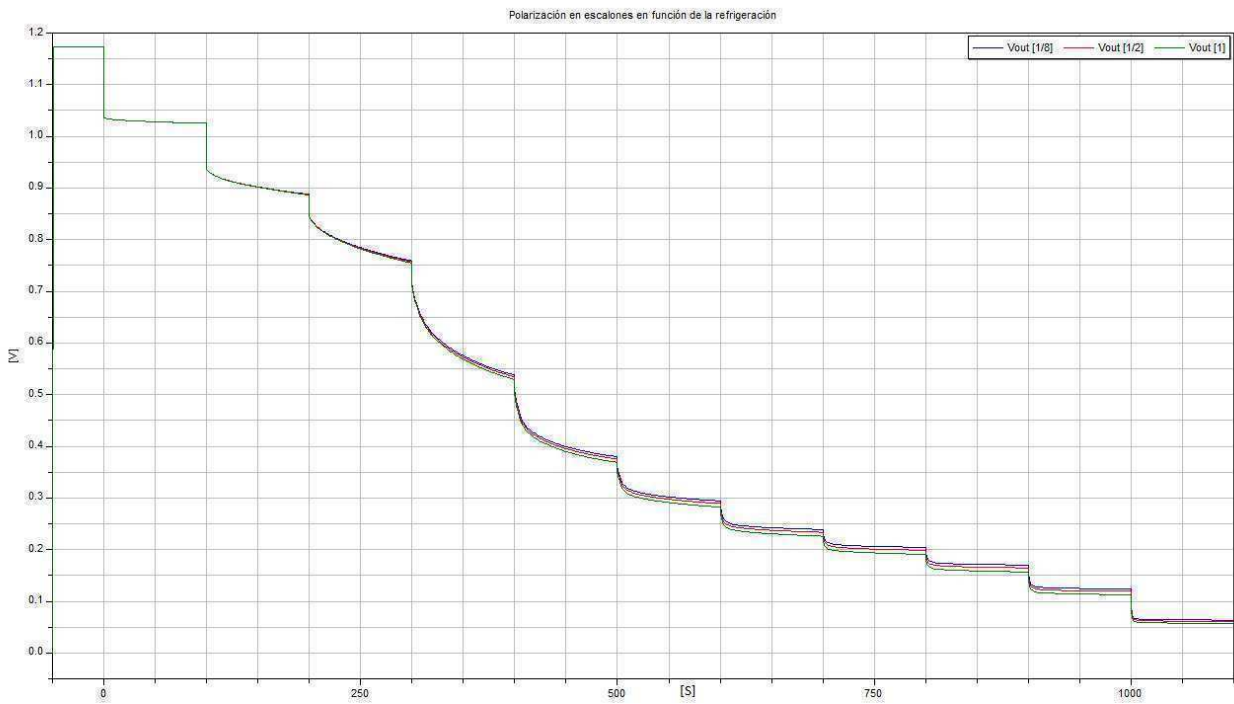


Figura 95 Polarización en escalones en función del caudal de refrigerante

Se puede apreciar que aumentar la refrigeración baja la temperatura, pero también ligeramente el rendimiento de la pila. La pila quiere trabajar con cuanto más temperatura mejor, pero hay factores limitantes como la evaporación del agua y la degradación de los materiales. No suele haber un caudal fijo que sea el óptimo, sino que se trabaja con caudales modulados analógicamente, de manera tal que si lo que se desea es que la temperatura suba, se baja el caudal. Si lo que se desea es que baje, se baja el caudal. Surge la duda, ¿qué caudales hacen subir o bajar la temperatura?

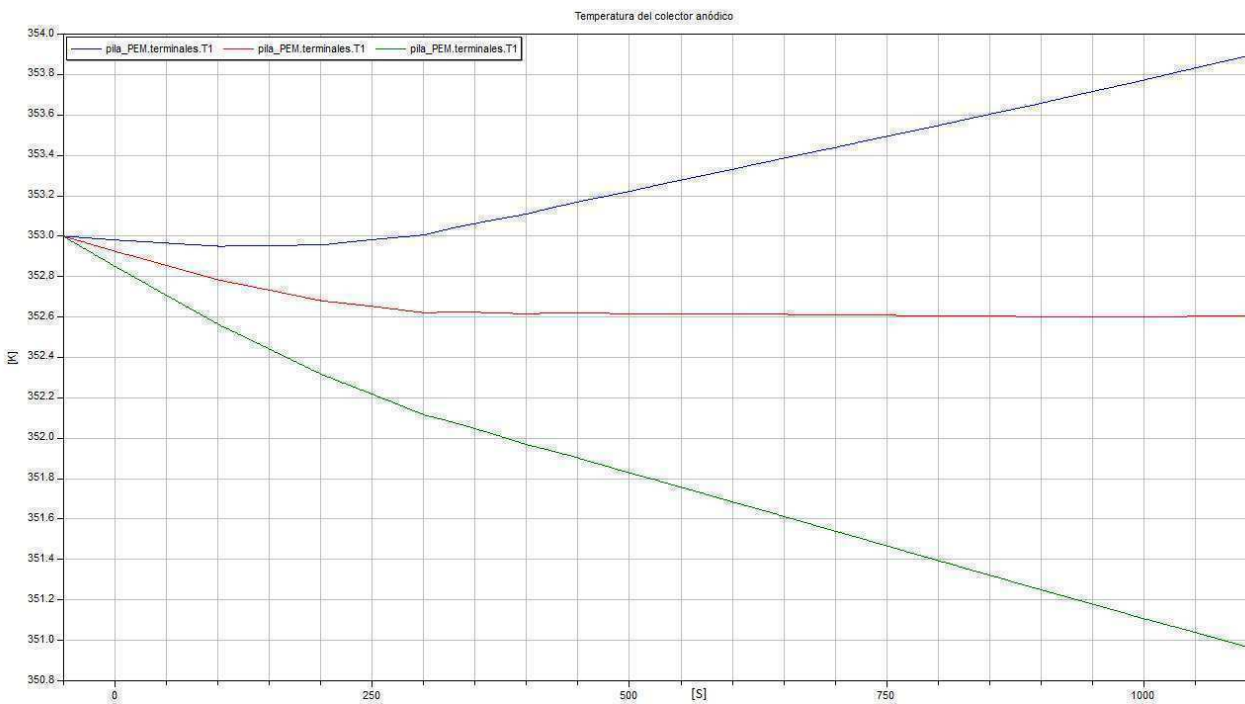


Figura 96 Evolución de la temperatura del colector anódico

Cuando la pila está trabajando con cargas, lo cual debería ser lo normal, resulta que un caudal de  $1/4 \left(\frac{l}{s}\right)$  (curva roja) disipa tanto calor como el que se genera, y entonces la temperatura se mantiene. Con un caudal de  $1/8$  (línea azul) la temperatura aumenta y con  $1 \left(\frac{l}{s}\right)$  (curva verde) se reduce.

A partir de estos datos se puede adivinar la dinámica térmica del sistema y diseñar un controlador sencillo de temperatura para la pila, que la coloque en la temperatura óptima de entre 80 y 90 grados.

#### 4.3.2.5. Variación en función de la carga

En la sección 4.3.2.1. ya se ha adelantado buena parte de lo que ahora se dirá.

1. Es la primera mitad de la curva de polarización en la que se producen los mayores movimientos de agua, con lo que se debería evitar dentro de lo posible.
2. El encharcamiento depende fuertemente de la corriente, de modo que en los máximos de corriente el encharcamiento puede ser de más del doble.
3. La excepción es el ánodo en su frontera con la difusora, región que tiende a secarse a medida que las corrientes aumentan.
4. El cátodo en su frontera con la difusora es la vía de escape del agua líquida y se refleja en que sus niveles de agua líquida allí son menores, pues se disipan a través de la difusora hacia el exterior por el colector catódico.

Se ha analizado la carga de agua en el ánodo y en el cátodo, a medida que aumenta la carga en escalones.

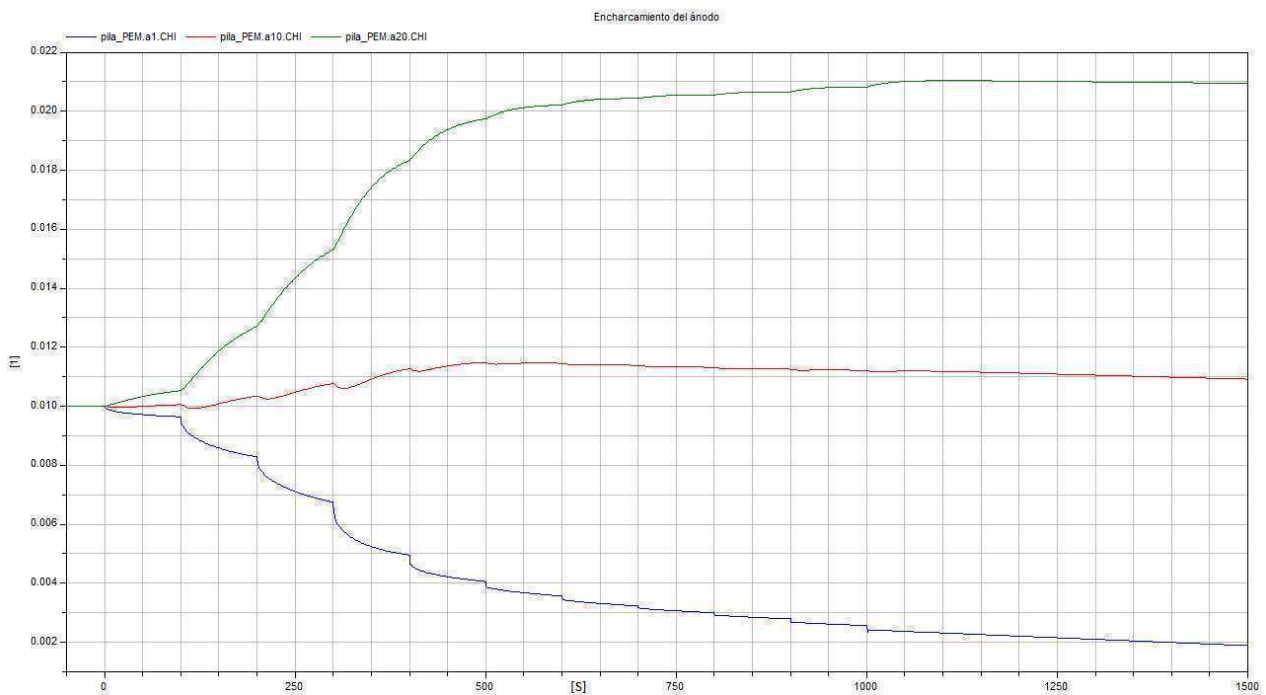


Figura 97 Encharcamiento en el ánodo

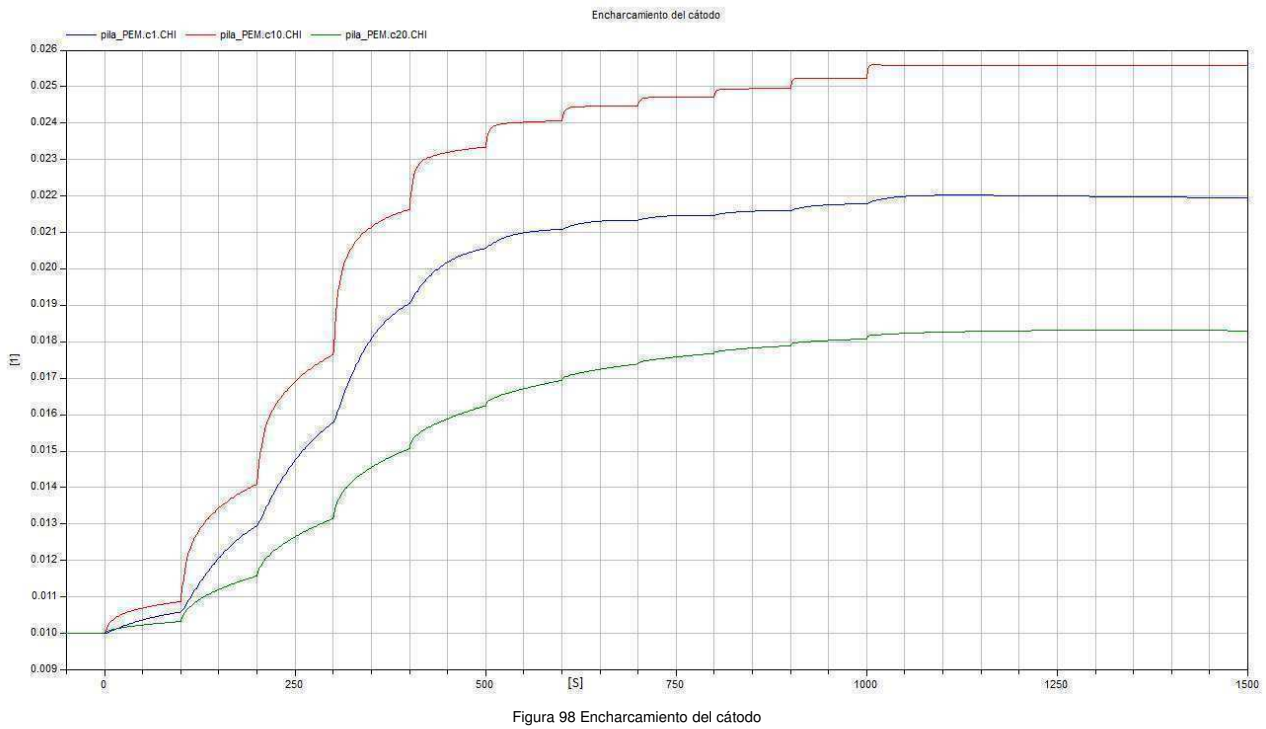


Figura 98 Encharcamiento del cátodo

Figuras similares a la 88 y 89, donde se puede apreciar el secado del ánodo y el escape del agua por el cátodo. El máximo de encharcamiento en el cátodo es en el volumen de control 9, mientras que en el ánodo es en la frontera con la membrana.

### 4.3.3. El defecto de masa en función de diversos parámetros

#### 4.3.3.1. Defecto original

Haciendo un análisis análogo al de la sección 3.3.2. en esta subsección se representarán tanto la presión absoluta como la ponderada, para mostrar así la influencia de la carga de agua en la presión efectiva de cada gas. En este análisis se toman en consideración las presiones en el ánodo y el cátodo.

La simulación conecta una carga que hace pasar unos 130(A) a través de la pila, dejando la tensión por debajo de 0.1(V) durante unos 100 segundos.

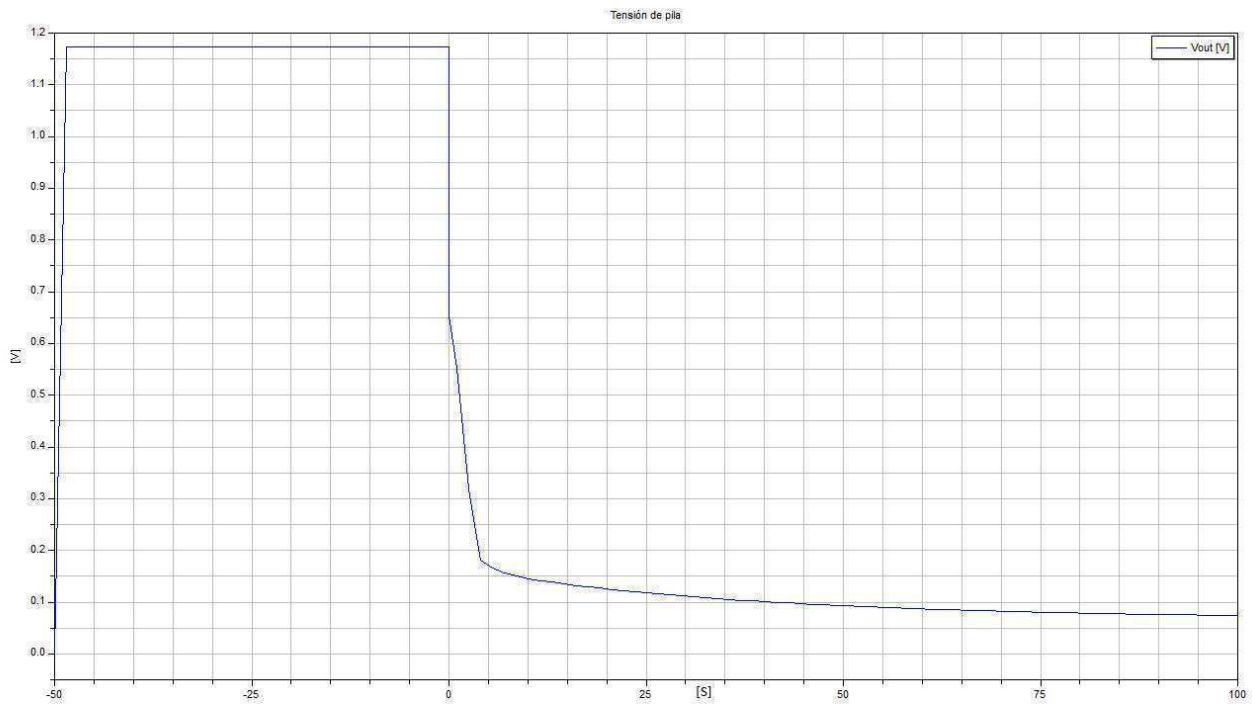


Figura 99 Evolución de la tensión de pila

La evolución de la tensión tiene la misma forma que la de la sección antes referida, pero circulando bastante menos corriente, puesto que hay más factores que generan pérdidas.

En lo que concierne a los transitorios de la presión, estos son los resultados para el cátodo.

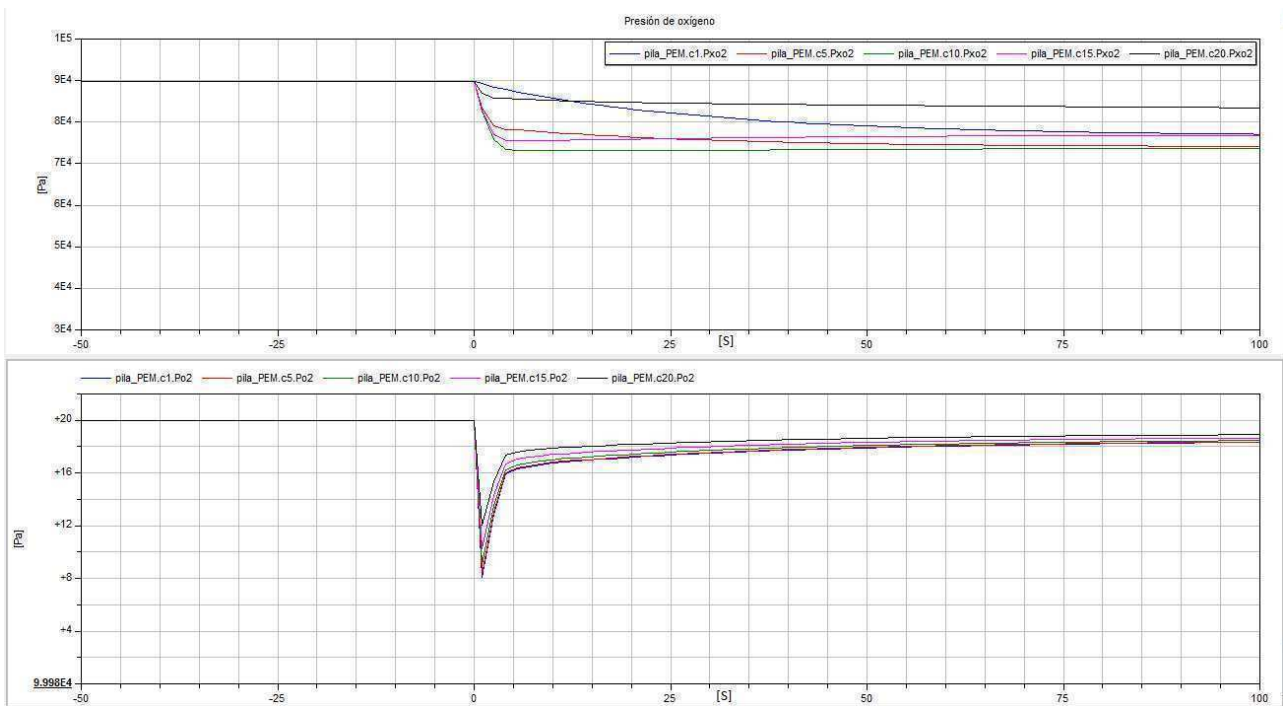


Figura 100 Presión de oxígeno en el cátodo

En la figura 100 se aprecia el transitorio en el cual la presión absoluta se reduce debido al repentino consumo eléctrico, y poco después la circulación de gas se normaliza y aumentan las presiones. En términos de presión absoluta el defecto de masa es de unos pocos pascales, muy pequeño. Por el contrario en términos de presión ponderada la variación es de casi 10000(Pa), lo que refleja de modo más realista el esfuerzo del gas para cruzar las capas. También refleja el nivel de encharcamiento puesto que si antes se comentó que el máximo de encharcamiento se encuentra en el volumen 9, ahora se tiene que el mínimo de presión ponderada se encontrará igualmente en dicho volumen.

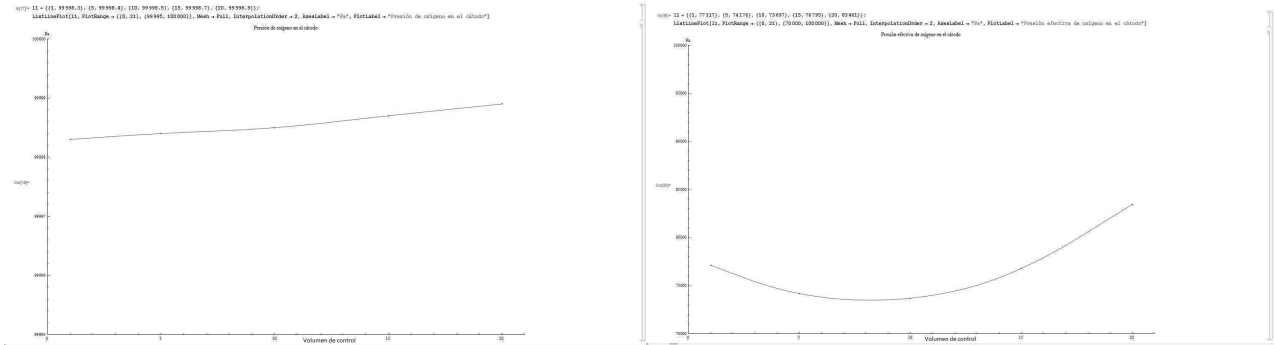


Figura 101 Evolución de las presiones de oxígeno a lo largo del cátodo

Se aprecia el mínimo cerca de los volúmenes 8-9, coincidiendo con el máximo de carga de agua. Por supuesto y como es normal, la presión es mayor en la frontera con la difusora y menor en las capas interiores fronterizas con la membrana.

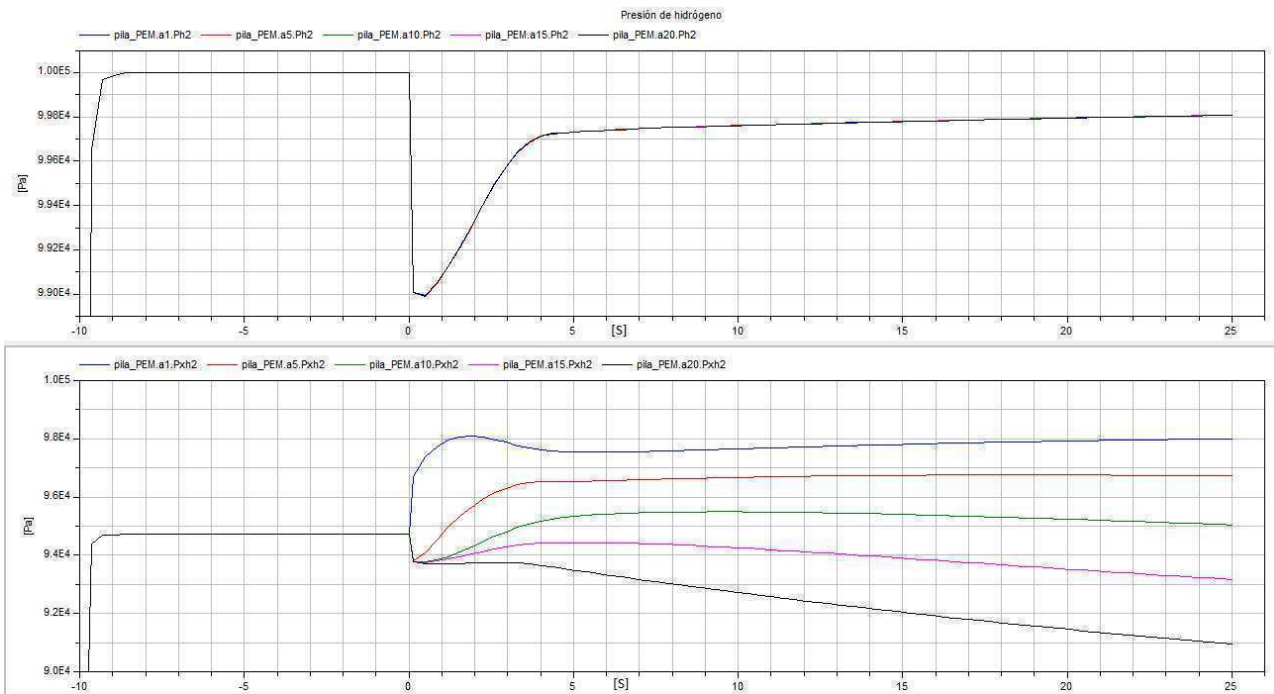


Figura 102 Presión de hidrógeno en el ánodo

En cuanto a la presión de hidrógeno, el defecto de masa en valor absoluto tampoco es grande, de hecho es tan pequeño como el del cátodo, pero fijémonos en algo importante. En su valor absoluto la presión tiende a estabilizarse cerca de los 99807(Pa), 191(Pa) menos que en el cátodo. Eso tiene fácil explicación, como se consume el doble de cantidad de hidrógeno que de oxígeno, lo normal es precisamente que la presión de hidrógeno sea menor. Eso apoya la validez del modelo, ofreciendo resultados coherentes con la realidad. El subpico transitorio es por tanto más intenso que el del oxígeno.

La presión ponderada presenta un abanico de unos 8000(Pa), algo menor que el del cátodo debido a que en general el ánodo está más seco. Apréciase esto en que las primeras capas se secan tanto que la presión ponderada aumenta, favoreciendo con ello la reacción, pero siempre sin que se llegue a secar completamente, pues eso penaliza. Por lo tanto y desde este punto de vista se vuelve a apreciar el efecto del secado del ánodo.

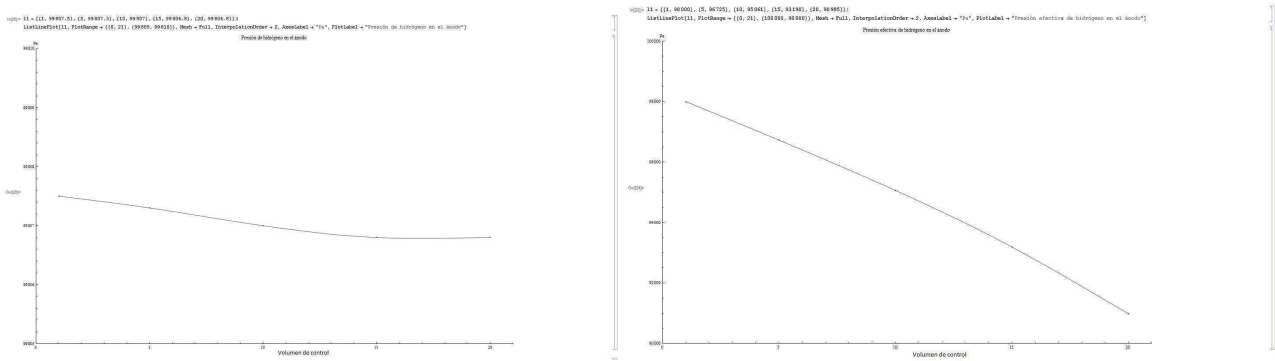


Figura 103 Evolución de las presiones de hidrógeno a lo largo del ánodo

El máximo de presión absoluta se encuentra en la frontera con la difusora, y el mínimo en las capas interiores, es razonable.

La presión ponderada tiene el mínimo en la frontera con la membrana, reflejando así el gradiente de concentración de agua líquida que se produce, y el efecto de bomba de agua que tiene el ánodo.

En general el defecto de masa es bastante notable y es un factor limitador, por lo menos en las condiciones de humedad elevadas que empleamos por defecto para estas simulaciones.

#### 4.3.3.2. Defecto de masa en función de la humectación

La humectación tendrá una decisiva influencia en el comportamiento de la pila a través del defecto de masa, en base a todo lo visto en las secciones y capítulos anteriores.

Es conocido que al bajar la humectación de la pila manteniéndola siempre por encima del 12% de humedad relativa, se mejora el rendimiento de la pila. Por lo tanto cuando baja la hidratación de la pila y con ello aumenta la corriente, es de esperar que se consuman más cantidad de gases combustibles, y que por lo tanto las presiones absolutas disminuyan al hacerlo la hidratación.

Por otro lado, dichas corrientes aumentan con la bajada de la hidratación, pero por el contrario bajará en general la carga de agua debido a la menor hidratación, haciendo que la presión ponderada aumente. El balance de los dos efectos se puede ver en las siguientes gráficas.

Se hace una simulación con una carga constante de 0.0005( $\Omega$ ), y presiones parciales de vapor de 40000(Pa), 20000(Pa) y 5000(Pa); curvas azul, roja y amarilla respectivamente.

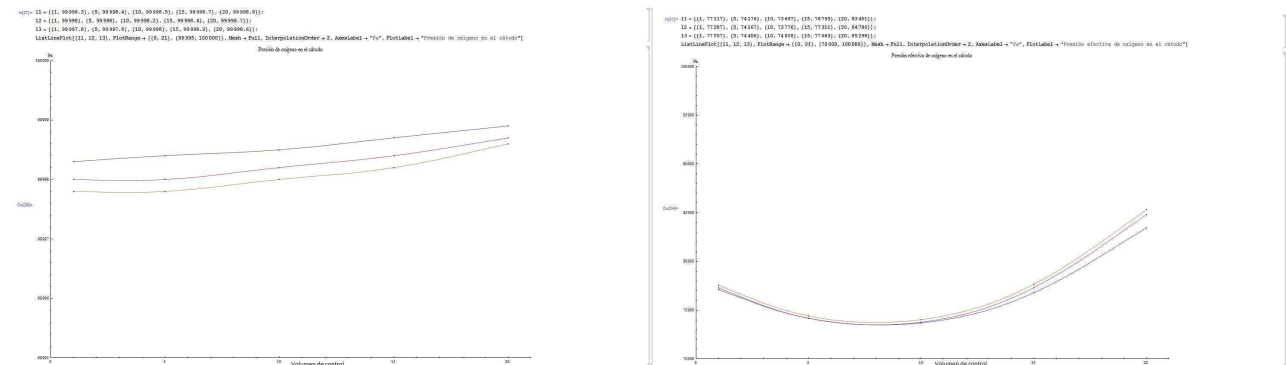


Figura 104 Evolución de las presiones a lo largo del cátodo

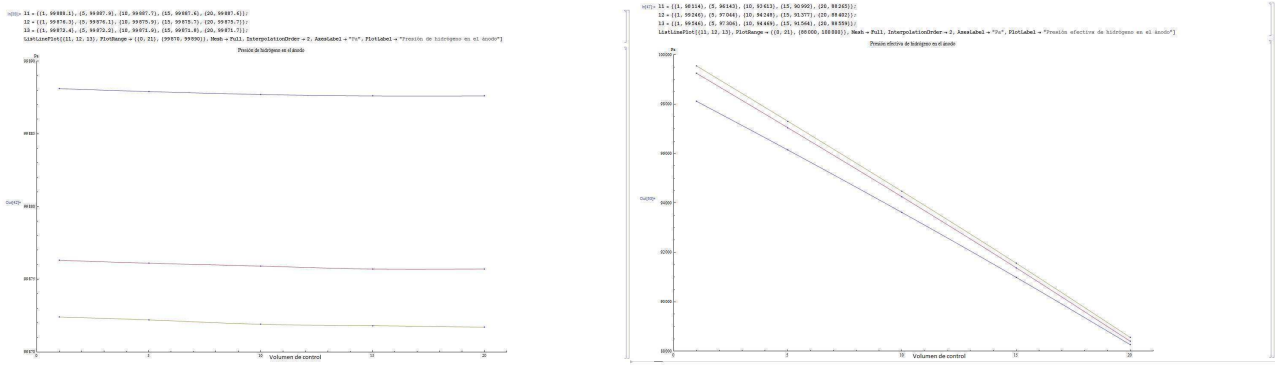


Figura 105 Evolución de las presiones a lo largo del ánodo

De los dos efectos, es más importante la bajada de la carga de agua, de modo que la presión ponderada aumenta con la bajada de la hidratación.

En conclusión, bajar la hidratación pero nunca por debajo del 12% de humedad relativa, tiene un efecto positivo o muy positivo para disminuir el defecto de masa tanto en el ánodo como en el cátodo.

**4.3.3.3. Defecto de masa en función de la refrigeración**

Es difícil saber cómo este factor puede alterar al encharcamiento. En principio una menor refrigeración significa una mayor temperatura con el tiempo, entonces la evaporación será mayor y la carga de agua menor. Realmente es muy pequeña la influencia de este parámetro en la carga de agua.

En las simulaciones se varía el caudal de refrigerante a través de los colectores: 1/8(l/s), 1/2(l/s) y 1(l/s) correspondiendo a las curvas azul, roja y amarilla.

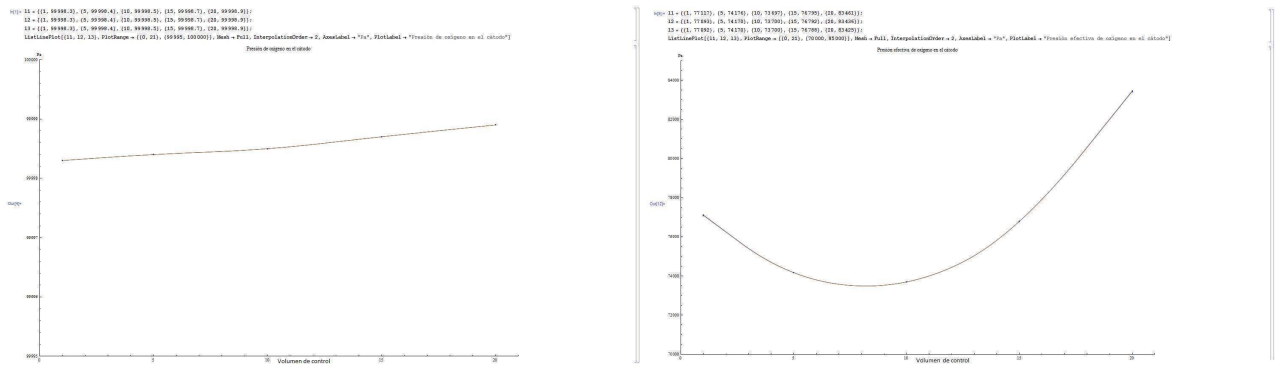


Figura 106 evolución de la presión a lo largo del cátodo

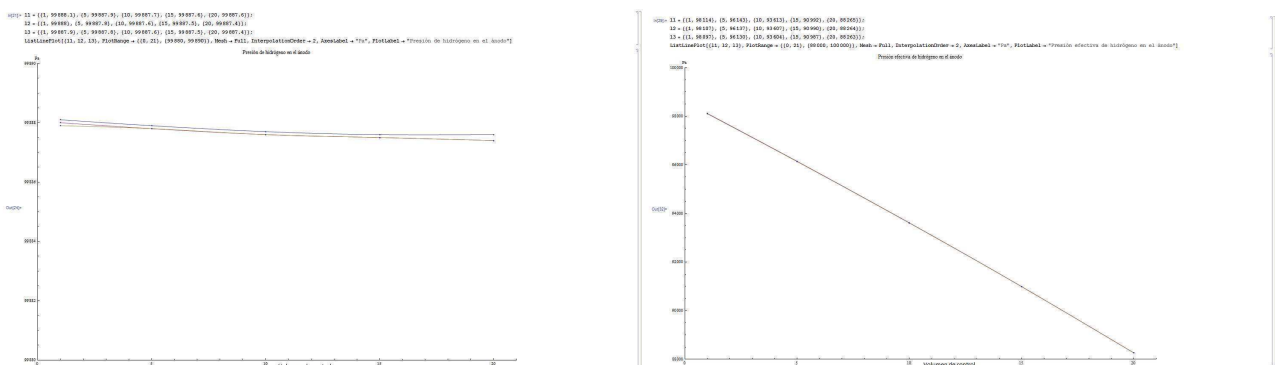


Figura 107 Evolución de la presión en el ánodo

La influencia de este parámetro en el defecto de masa es muy pequeña, y se cumple además que aumentando la refrigeración y por ende bajando la temperatura, bajan la carga de agua y la presión ponderada.

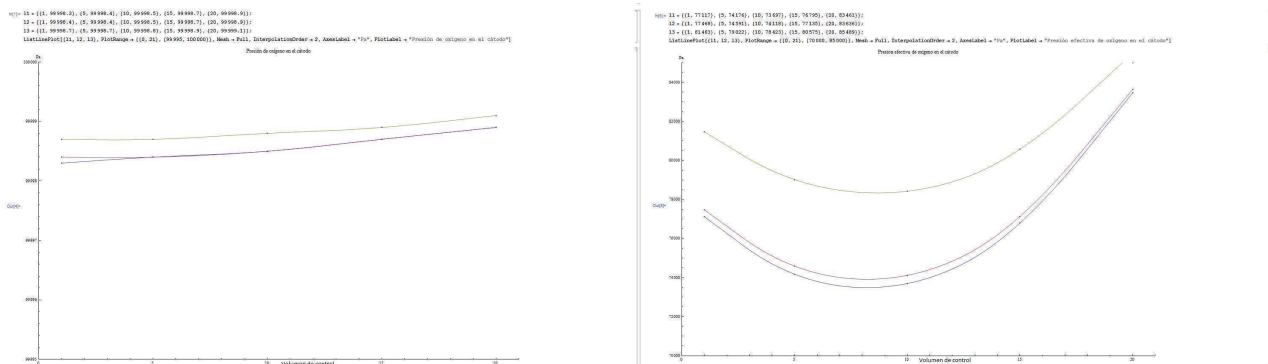
La presión absoluta también baja ligerísimamente porque los coeficientes de difusión son menores a menores temperaturas, lo que se produce con mayores refrigeraciones.

En conclusión, no es apenas apreciable el efecto de la refrigeración en el defecto de masa.

#### 4.3.3.4. Defecto de masa en función de la carga

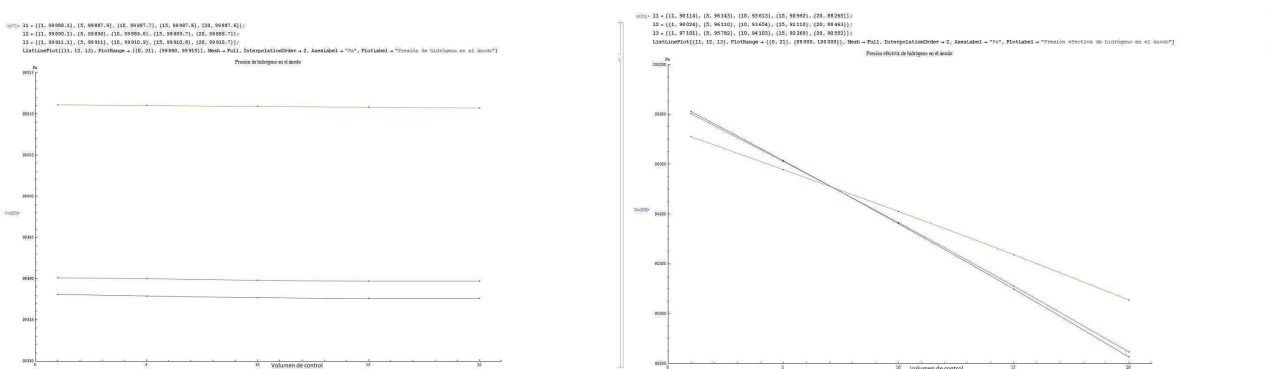
Partiendo de la base de que la conducción gaseosa es en general bastante buena, lo más probable es que el defecto de masa absoluto sea pequeño, así como también sus variaciones. Por otro lado, en lo que se refiere al defecto de masa ponderado, depende mucho de la carga de agua, por lo que dependerá mucho de la corriente eléctrica. Se espera encontrar variaciones significativas en lo concerniente a la presión ponderada.

Se hacen tres simulaciones con 0.0005, 0.001 y 0.005 ( $\Omega$ ) de carga, correspondiendo a las curvas azul, roja y amarilla.



Los resultados cuadran con lo que cabía esperar. La presión absoluta aumenta al disminuir la carga (curva amarilla) y con ello baja el defecto de masa, pero la presión ponderada aumenta mucho más debido a la significativa reducción del encharcamiento del cátodo. Se podría decir que la carga de 0.005 ( $\Omega$ ) es una carga límite a partir de la cual los encharcamientos contribuyen significativamente al defecto de masa. Esa carga se corresponde aproximadamente con unos 130(A) en la [gráfica 75](#), un poco antes del PPM y en la zona central del rango dinámico. También es la zona en la que los movimientos de agua son mayores como se aprecia en la [figura 76](#). Precisamente porque los movimientos de agua son mayores, la distancia entre las curvas de presión ponderada también es mayor.

En lo que se refiere al ánodo cabe decir que la pendiente de la curva ponderada con signo menos, es proporcional al bombeo de agua ejercido por el ánodo. Además está el hecho de que debido al mayor consumo de hidrógeno que de oxígeno, el defecto de masa absoluto en el ánodo es mayor que en el cátodo, así como también lo son las diferencias entre las presiones absolutas.



Los resultados son similares a los del cátodo y muestran que la influencia de la carga en el defecto de masa es bastante importante y condiciona las características de la pila.

La frontera de los 0.005 ( $\Omega$ ) parece ser un límite a partir del cual se manifiestan ostensiblemente los defectos de masa debidos especialmente a los encharcamientos.

#### 4.3.4. Colectores y variables macroscópicas

##### 4.3.4.1. Potencia y temperaturas en función de la refrigeración

Hasta ahora la curva de potencia se ha obtenido haciendo variar la corriente de línea a razón de un amperio por segundo, para de esa forma poder representar las abscisas como corriente al coincidir con el tiempo en segundos. Tiene no obstante una pequeña pega y es que el tiempo de asentamiento de los fluidos que puede llegar a los 100 ó 150(s), está en el orden de magnitud de la simulación, con lo que aunque está cerca del equilibrio, para los fluidos no.

A continuación se repite el experimento haciendo variar la corriente a razón de 0.1 amperio cada segundo, de ese modo el tiempo del experimento se multiplica por diez y en las abscisas, el tiempo coincide numéricamente con diez veces la intensidad de línea. Obrando así, se tiene el modelo con los fluidos prácticamente en equilibrio en cada instante de la simulación, se comprueba a continuación, que con eso el rango dinámico y el PPM son menores.

En las abscisas de la siguiente gráfica, se representan los amperios de consumo pero en las condiciones suprascritas.

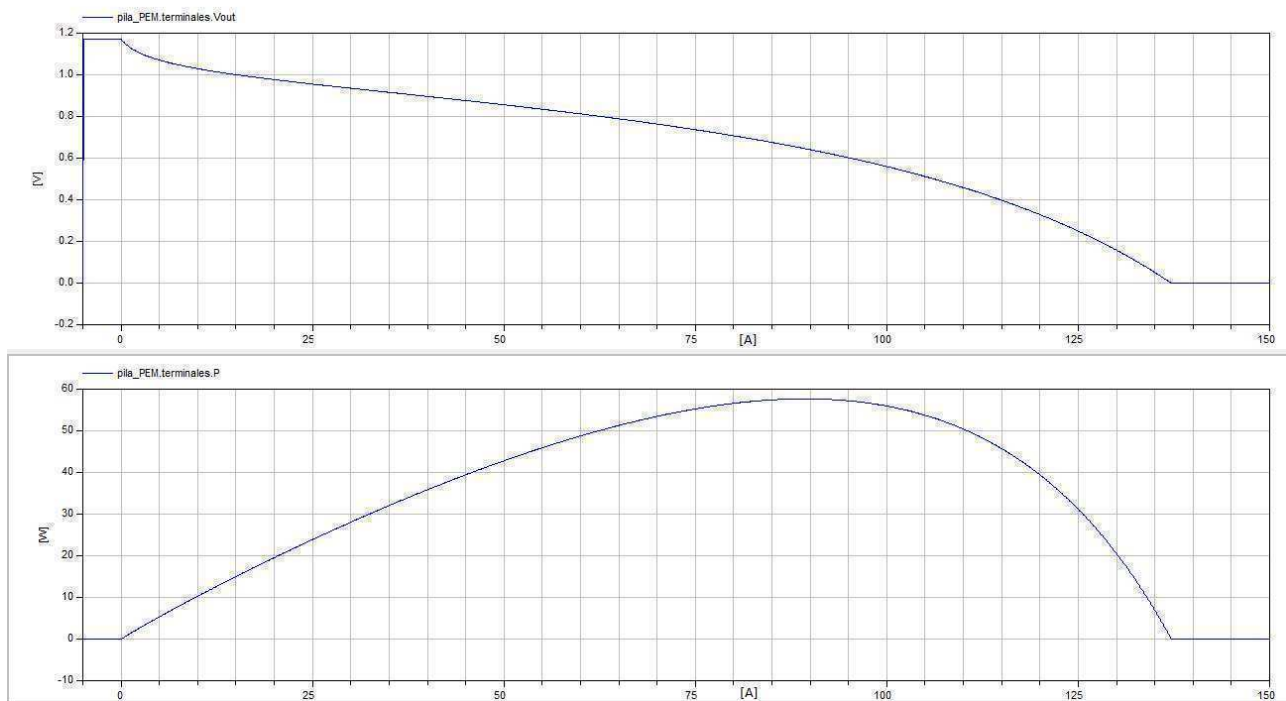


Figura 110 Curvas de potencia y polarización

Comparándolo con las figuras 75 y 77 se aprecia una importante reducción del 39% de rango dinámico y del 42% de PPM, lo que da a entender la importancia de la circulación de líquidos en el interior de la pila y en tiempos largos de más de 15 ó 30 minutos. Esos tiempos son los que hay que considerar, puesto que la pila se concibe como un generador que estará funcionando más o menos de forma continuada.

La conclusión importante que se obtiene de todo esto es que hay cuatro tipos de dinámicas conectadas:

1. Las dinámicas de los gases, con tiempos de estabilización de segundos.
2. Las dinámicas eléctricas, con tiempos de estabilización infinitesimales.
3. Las dinámicas de los fluidos, con tiempos de estabilización de varios minutos.
4. La dinámica de la refrigeración, con tiempos de asentamiento para la temperatura de varias horas.

Dependiendo de la aplicación, se puede modelar la pila con las dinámicas que necesitemos, para este trabajo se emplean todas.

También se debe aclarar la forma en la que se harán los siguientes experimentos. El PPM considerando las dinámicas lentas se sitúa ahora en:  $P = 57.67$  (W);  $V_{out} = 0.65$  (V);  $I_{línea} = 89.7$  (A);  $R_{carga} = 0.00726$  ( $\Omega$ )

Con las nuevas simulaciones se hace trabajar a la célula en el PPM conectando una resistencia de  $0.007(\Omega)$  durante más de 30 minutos y entonces se anotan las temperaturas de su interior; la forma de su distribución espacial será estable pero no así su valor absoluto, el cual no importa. Para las curvas de potencia se hace circular el flujo de aire señalado en la gráfica (en litros por segundo) y en esas condiciones se calcula la curva de potencia mediante simulación.

Se muestran los resultados de las simulaciones.

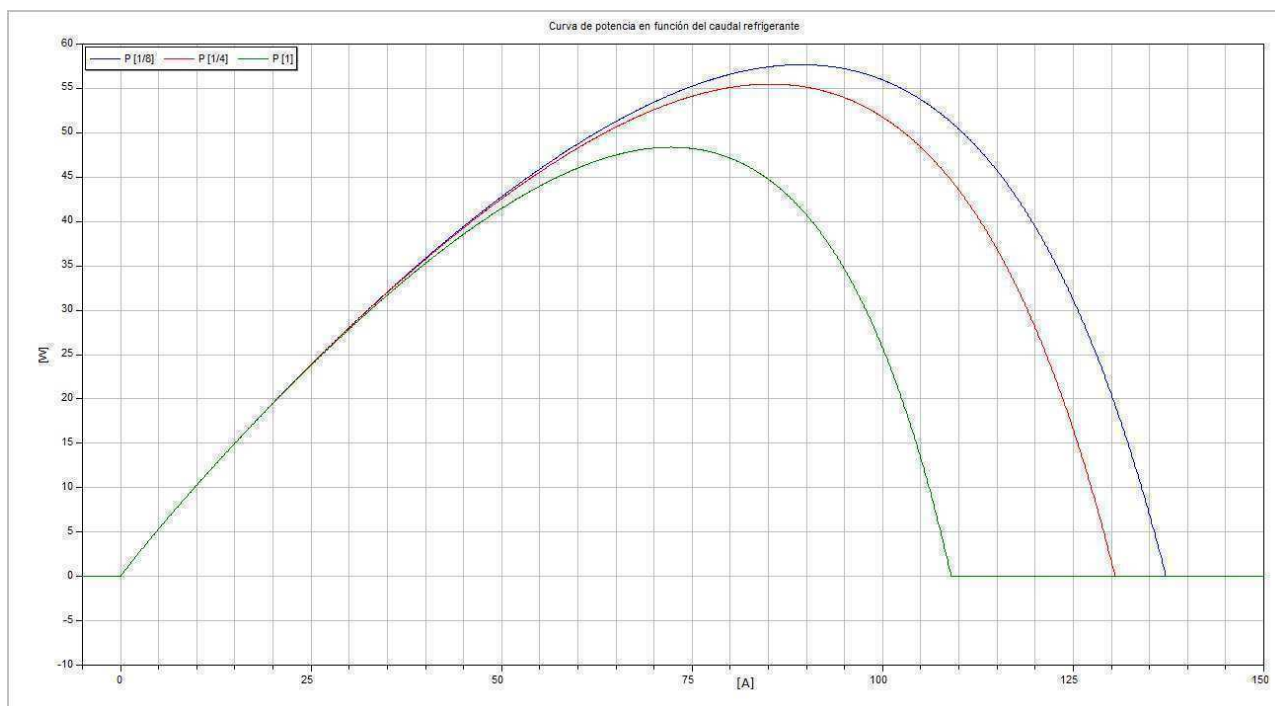


Figura 111 Curvas de potencia en función del caudal refrigerante

Recordando que las abscisas representan  $I_{\text{línea}}$  en evolución lenta, se observan los efectos de la refrigeración. La pila PEM es un dispositivo que necesita estar caliente y que si no fuese por la evaporación del agua o la degradación de los materiales, trabaja mejor cuanto mayor sea la temperatura. Por esa razón se utilizan sobre los 80°C, un valor de compromiso ya que olvidando los anteriores efectos funcionaría mejor a 90 ó 100...

Pese a que la influencia del rendimiento catalítico con la temperatura no está aún modelada, se puede ver que el efecto de aumentar la refrigeración y con ello bajar la temperatura, es un empeoramiento del rendimiento de la pila de forma considerable. En la simulación no se han considerado refrigeraciones menores que tiendan a calentar la pila, puesto que no está perfectamente modelado el efecto de ebullición del agua líquida y la simulación no sería realista. Así y todo, los resultados hacen comprender que el sistema de refrigeración debe tener en cuenta que la pila trabaje entre los 80 y 90°C, y que no se debe salir de ese margen puesto que se producen pérdidas considerables.

En la subsección 4.3.1.6. se analizaron los factores que dependen de la temperatura en el modelo, pero ahora considerando las dinámicas más lentas se aprecia clara la influencia de la temperatura en la polarización.

Hablando ahora de la distribución de las temperaturas en el interior de la pila, empleando el método antes descrito y al margen de la temperatura absoluta que no interesa, la curva de distribución de las temperaturas tiene estas formas en función del caudal refrigerante.

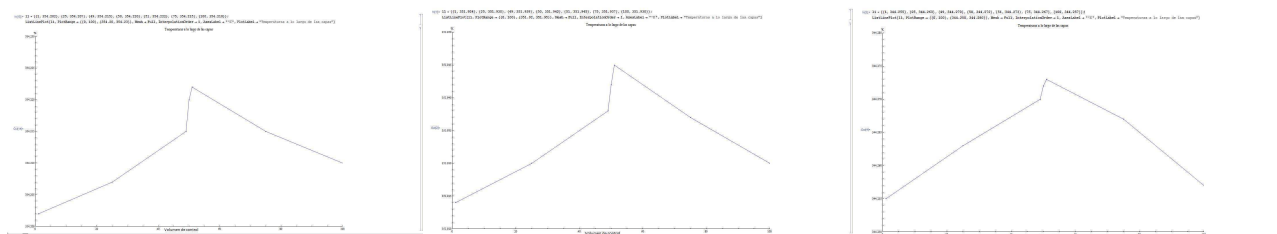


Figura 112 Distribución espacial de la temperatura

La célula es muy fina y por esolas gráficas muestran un margen de tres décimas de grado.

Al margen de la temperatura absoluta, las distribuciones espaciales se parecen mucho. Se puede decir lo siguiente.

- La cresta del medio se corresponde a la membrana y tiene tanta pendiente debido a su baja conductividad térmica.
- Por la razón supracrita, la mayor parte de la energía del cátodo se disipa hacia el colector catódico y la del ánodo hacia el colector anódico, actuando la membrana como una especie de aislante que divide térmicamente la pila en dos mitades.
- La mayor generación térmica del cátodo con respecto al ánodo se debe sobre todo a su mayor sobrepotencial de activación y la ecuación (3.22).
- Si la distribución en una región no es una recta es porque se aleja del estado estacionario en lo que a temperatura se refiere.
- El cátodo está más caliente que el ánodo.

La distribución del medio es la que parece estar más estacionaria, y de hecho la temperatura absoluta también se mantiene casi constante. Las otras dos, una más cóncava y la otra convexa, reflejan el esfuerzo de los colectores en la modificación de la temperatura. En el primer caso (izquierda) disipando poco, la energía térmica se acumula en su viaje hacia el exterior de las capas difusoras. En el segundo caso (derecha) disipando mucho, la energía se extrae con especial intensidad cerca de los colectores.

Como conclusión, la refrigeración afecta considerablemente a la temperatura absoluta de la célula, pero no tanto a la distribución espacial de la temperatura. Además por la forma de ésta podemos saber si la temperatura está en equilibrio.

También hemos comprobado la importancia de mantener caliente la célula PEM para obtener buenos rendimientos.

#### 4.3.4.2. Potencia y temperaturas en función de la humectación

Recordando los resultados anteriores referentes a la humectación, el experimento por defecto de la librería trabaja en unas condiciones de humedad excesivamente altas. Resulta que si bajamos la presión de vapor, las características de la pila mejoran, así como la potencia y el rango dinámico. Es ahora evidente que los resultados anteriores están en el mismo sentido que los de esta sección.

Al trazar las curvas de potencia lentas, se verifica que la disminución de la hidratación mejora las características de la pila, siempre que no se baje de unos límites que andan sobre el 12% de humedad relativa. Por debajo de dicho límite las características de la pila caen bruscamente.

En la siguiente simulación, se varía la presión de vapor y se calcula la curva de potencia variando a razón de  $0.1 \left(\frac{A}{s}\right)$  la corriente de pila.

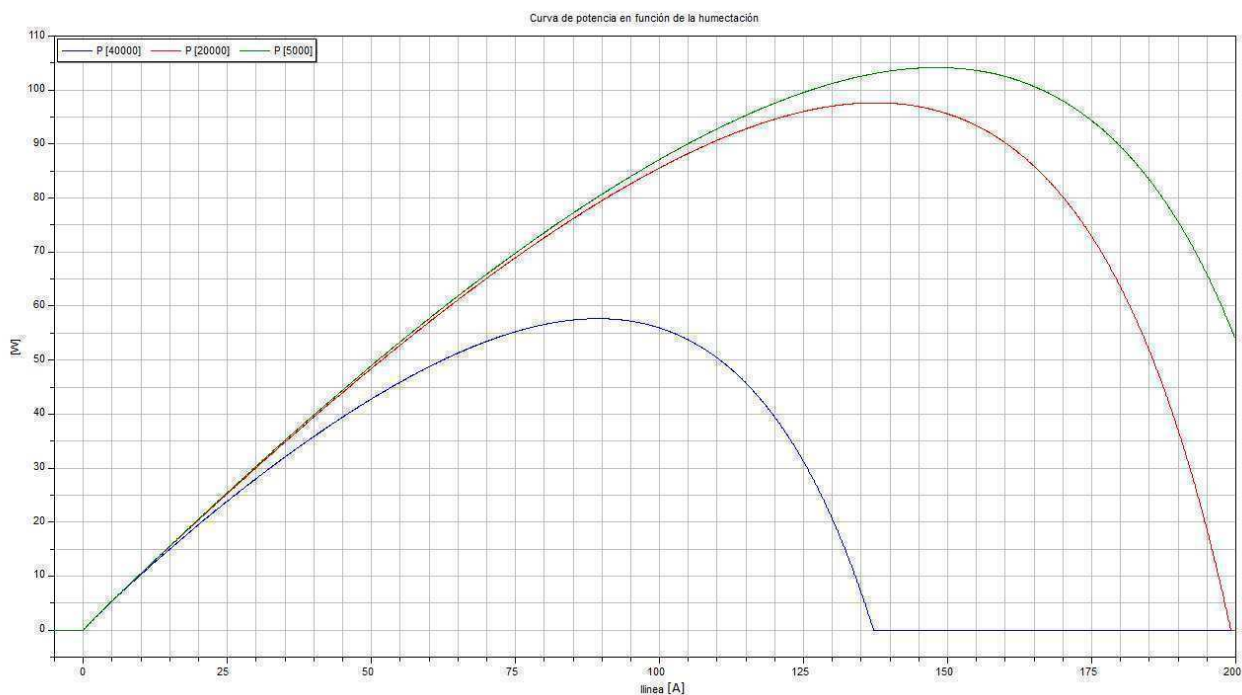


Figura 113 Curva de potencia en función de la humectación

Ese 12% se corresponde aproximadamente con la curva verde, de 5000(Pa) de presión parcial de vapor de agua. La influencia del encharcamiento es enorme y se refleja extraordinariamente en las curvas de potencia. Las razones por las cuales se produce esta variación han sido explicadas en las secciones anteriores pero se deben sobre todo al aumento del sobrepotencial de concentración debido a la disminución de la presión ponderada tanto del hidrógeno como del oxígeno.

La forma que toma la distribución de las temperaturas no va a variar apenas con los cambios en la presión de vapor de agua. La forma es ligeramente cóncava lo que se corresponde con una transmisión de energía térmica que está llegando al equilibrio de temperatura pero no lo ha alcanzado, dicho equilibrio se alcanza cuando la distribución de temperatura es una línea recta. Eso es resultado de resolver la ecuación de Fourier con condiciones de contorno [3].

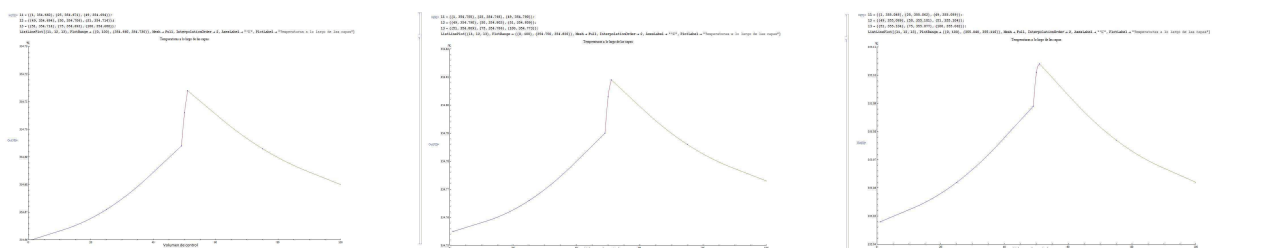


Figura 114 Distribución espacial de la temperatura

De hecho, tanto la distribución como la temperatura absoluta son casi iguales en los tres casos, pese a que están entregando diferentes cantidades de potencia. Eso sólo puede significar que el rendimiento es mejor en los casos que respetando los límites, tienen menor hidratación. Las simulaciones indican eso, pero también es cierto que las pilas con menor hidratación disipan más y se calientan más que las otras.

Sólo se puede sacar la misma conclusión de secciones anteriores, el punto óptimo de trabajo para la pila es cercano al 12% de humedad relativa de los gases de alimentación, léase unos 5000(Pa) de presión de vapor de agua.

En cuanto a la forma de la distribución de la temperatura, nuevamente existe una difusión del cátodo hacia el colector catódico y del ánodo hacia el colector anódico. La membrana actúa como barrera aislante pero el poco flujo que tiene disipa desde el cátodo hacia el ánodo. La conducción térmica es el mecanismo dominante, siendo muy pequeños los efectos de la convección y la transición de estado del agua.

Ya por último, en cuanto a la temperatura de los colectores, debido al modelado del efecto refrigerante la temperatura en ellos varía con el tiempo y converge o no, dependiendo de la potencia entregada por la pila y de los caudales y temperatura del fluido refrigerante y la temperatura misma del colector.

#### 4.3.4.3. Potencia y temperaturas en función de las presiones de los gases

Dado que se manejan dos gases reactivos, habrá que hacer dos grupos de pruebas.

Comenzando por el hidrógeno, a continuación se analiza cómo reducir o incrementar la presión puede afectar a la tensión de la pila y con ello a la potencia y temperaturas.

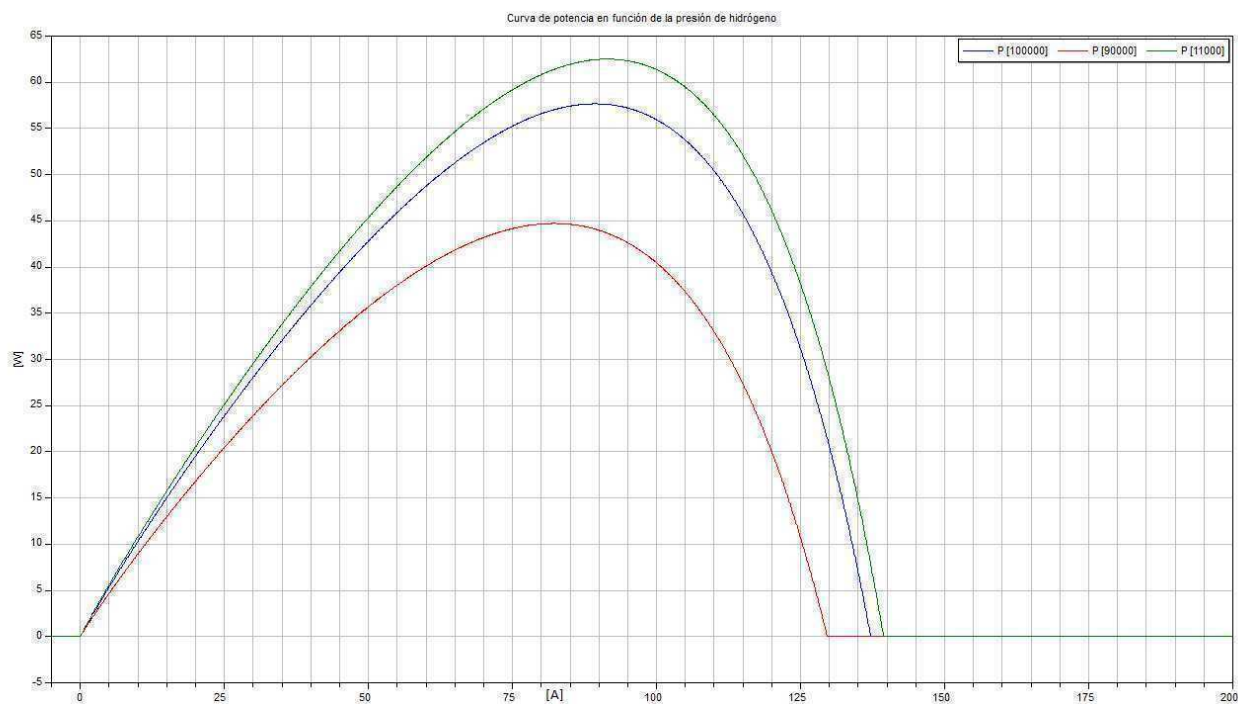


Figura 115 curva de potencia lenta en función de la presión de hidrógeno

El sentido en el que actúa un aumento de presión es incrementar la tensión de pila al reducirse o invertirse el sobrepotencial de concentración según (4.2), (4.3) y lo explicado en 4.3.1.7. La influencia de las variaciones en la presión del hidrógeno son menores que las de variar la presión del oxígeno, puesto que se retocaron las ecuaciones de modelado para tal fin, y está explicado en la subsección antes mencionada. Por lo tanto en lo que se refiere a la entrega de potencia, se puede compensar el encharcamiento mediante la sobrepresión en la medida de lo técnicamente posible.

Por otra parte las temperaturas absolutas no variarán mucho, pero siempre será mayor la temperatura que aporta más potencia (curva verde) hecha a 110000(Pa), mientras que la curva roja hecha a 90000(Pa) estará más fría. Precisamente la mayor temperatura hace que la distribución de temperatura tenga una forma más escarpada que la menor temperatura con una forma un poquito más plana.

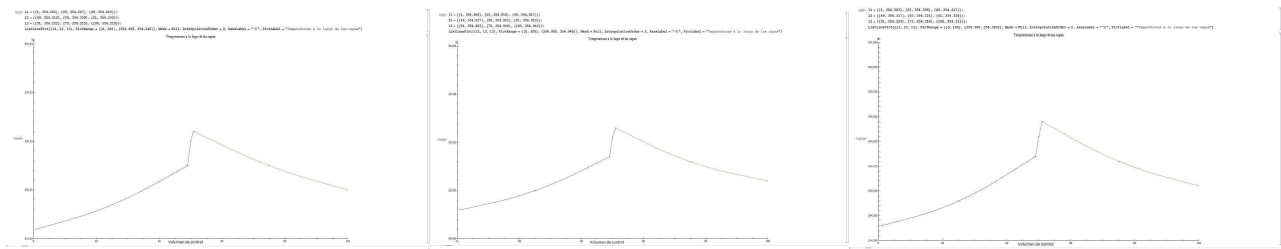


Figura 116 Evolución de la temperatura a lo largo de la pila

A la izquierda de la figura 116 la distribución original y en el centro y derecha las distribuciones de 90000 y 110000(Pa). Apréciase que la figura de en medio es en efecto un poquito más plana que las otras dos, en especial la derecha. En cuanto a la forma se corresponde con una transmisión de calor que no ha llegado a su equilibrio como muestra su forma ligeramente cóncavo. La forma general de la distribución parece ser una constante en términos generales, variando sólo en tamaño o matices.

Con respecto al oxígeno los resultados siguen en la misma línea pero con mayor intensidad, simulando de esta forma el rendimiento catalítico algo menor de la disociación del cátodo y su reacción con los protones.

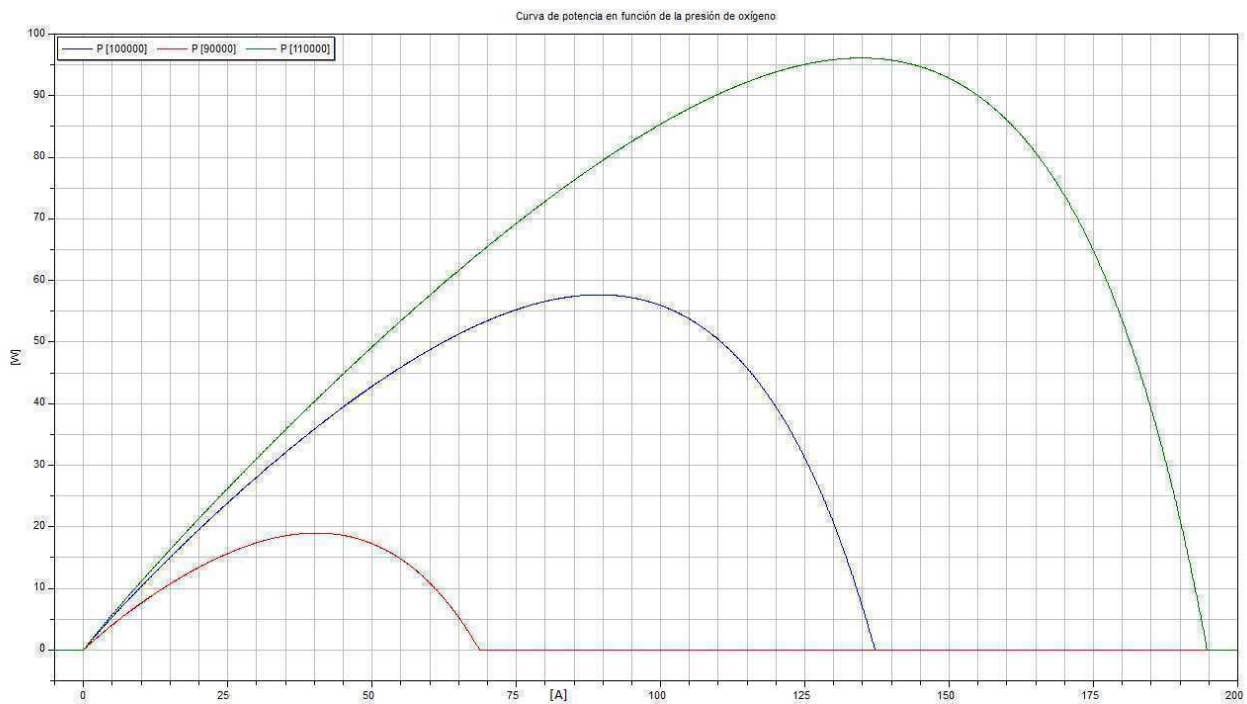


Figura 117 Curva de potencia lenta en función de la presión de oxígeno

En este caso la reducción de la potencia cuando se reduce la presión del oxígeno es intensa, pero también es considerable la mejora de las prestaciones en el caso contrario. En este caso son las ecuaciones (2.20) y (2.21) ya referidas en la subsección 4.3.1.7. las principales responsables de esta conducta.

Si se tiene en cuenta la notable influencia de este parámetro en las características de potencia de la pila, es de esperar que la forma de la distribución de temperatura también lo note, siendo más plana en el caso de la simulación con menor presión y más escarpada en el caso de la mayor presión.

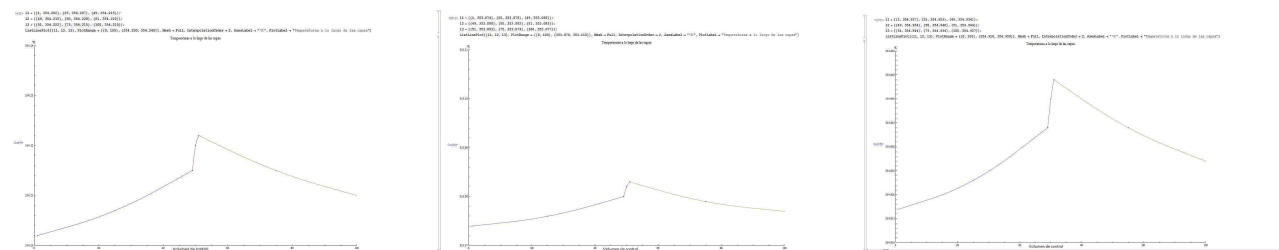


Figura 118

En el centro la distribución que se corresponde a la menor presión, a la izquierda la original y a la derecha la mayor presión. Teniendo en cuenta que la diferencia en potencia es muy grande, la diferencia de temperaturas también, lo que se aprecia en la forma de la distribución y en la temperatura absoluta. Los flujos de energía son similares a los hasta ahora descritos y la forma cóncava se corresponde con un estado transitorio.

#### 4.4. Resumen y conclusiones

Con este capítulo acaba el trabajo de fin de máster y el modelado de la célula de combustible PEM.

Al finalizar se ha mostrado la evolución del modelo y ha ido depurándose capítulo tras capítulo, para ir englobando cada vez más y más fenómenos físico-químicos. Debido a que la principal función de esta librería y sus modelos es la académica, se han incluido fenómenos que normalmente no sería necesario contemplar en algún otro modelo más profesional. Con ello tanto el tamaño del código, sus recursos de memoria y velocidad se ven relegados por una máxima capacidad descriptiva del modelo; aún así, ha sido depurado para que fuese lo más rápido posible.

Haciendo un balance de los objetivos tratados en este capítulo, cabe citar los siguientes:

- Modelado del ánodo, siguiendo la estructura del cátodo pero con sus particularidades y características específicas.
- Inclusión del sobrepotencial de activación anódico.
- Revisión de los valores de algunos parámetros y planteamiento de nuevos valores para el recientemente creado ánodo, así como para los colectores.
- Reforma del modelo "terminales" para convertirlo casi por completo en el modelo de los colectores.
- Remodelado del efecto refrigerante en los colectores, considerando un flujo constante y configurable de fluido.
- Remodelado de la carga de agua en los colectores en función de la presión de vapor de agua.
- Consideración de la difusión del gas hidrógeno.
- Análisis térmico de las capas.
- Análisis pormenorizado de los nuevos modelados en función de muchos parámetros.
- Modelos completos de la pila y sus colectores que permiten crear modelos de stack, pero que hay que manejar con prudencia porque la creación de un stack grande puede ser computacionalmente muy cara.
- Referencias a los cuatro tipos de dinámicas de la pila.

En lo que se refiere a la precisión de este modelo final, no ha sido cotejada con respecto a dispositivos reales concretos. La finalidad de este trabajo es sobre todo el modelado, mientras que el ajuste del modelo a una pila real es tan sólo un acto de ajuste de parámetros. En este sentido la identificación de parámetros de cualquier pila de este tipo, puede basarse en los conocimientos que aporta este análisis en cuanto a la cantidad y sentido de las variaciones de los parámetros en las características macroscópicas de la pila. Ese puede ser un futuro campo de trabajo.

En definitiva, el objetivo era que cuanto menos cualitativamente el modelo fuese fiel a la realidad, lo cual parece cumplir de sobra. También es cierto que las simulaciones han enseñado mucho sobre este tipo de células de combustible a lo largo de este análisis, siendo que algunas sorprenden por inesperadas o insólitas. Desde luego, la cantidad de información que este modelo es capaz de entregar es muy grande.

Finaliza aquí este modelo y este trabajo de fin de máster.

Dueñas 17 de junio de 2012.

## Lista de referencias y bibliografía

- [1] Prácticas de modelado orientado a objetos de pilas de combustible PEM, en el ámbito del control automático. Enrique Martínez Varas.
- [2] Modelado orientado a objetos de pilas de combustible PEM, en el ámbito del control automático. Miguel Ángel Rubio González y Alfonso Urquía Moraleda.
- [3] Ecuaciones de la física matemática. Tijonov , Samarsky.
- [4] A review of mathematical models for hydrogen and direct methanol polymer electrolyte membrane fuel cells. Yao, Karan, McAuley, Oostuizen, Peppley, Xie.
- [5] Parametric modelling of the performance of a 5(KW) proton-exchange fuel cell stack. Amphlett, Baumert, Mann, Peppley, Roberge y Rodrigues.
- [6] Control of fuel cell Systems. Pukrusgpan, Stefanopoulou, Peng.
- [7] [http://www2.dupont.com/FuelCells/en\\_US/products/nafion.html](http://www2.dupont.com/FuelCells/en_US/products/nafion.html)
- [8] [http://www.nafionstore.com/category\\_s/6.htm](http://www.nafionstore.com/category_s/6.htm)
- [9] Polymer electrolyte fuel cell model. Springer, Zadowdzinski, Gottesfeld.
- [10] Parametric modelling of the performance of a 5-KW proton exchange membrane fuel cell stack. Amphlett, Baumert, Mann, Peppley, Roberge, Rodrigues.
- [11] Modelling of performance of PEM fuel cells with a conventional and interdigitated flow fields. Kazim, Liu, Forges.
- [12] Modelling and optimization of the air system in polymer exchange membrane fuel cell systems. Bao, Ouyang, Yi.
- [13] In plane gradients in fuel cell structure and conditions for higher performance. Wilkinson, St-Pierre.
- [14] Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC. Knights, Colbow, St-Pierre, Wilkinson.
- [15] Simulations of PEFC cathodes: an effectiveness factor approach. Gloaguen, Durand.

## Listado de siglas, abreviaturas y acrónimos

PEM:	Proton Exchange membrane, también denominado polymer electrolyte membrane.
DYMOLA:	Dynamic modelling laboratory.
PPM:	Punto de potencia máxima.
FEM:	Fuerza electromotriz.
ODE:	Ordinary differential equations.
DAE:	differential algebraic equations

## **Agradecimientos**

A Miguel Ángel Rubio por aceptar dirigir este trabajo.

A Alfonso Urquía por toda su ayuda.

A mi mujer María José por su paciencia y apoyo.

## Anexo A

### **Código de la librería:**

```
package Celula_PEM_3 "Incorpora el modelado anodico"

import unidades = Modelica.SIunits;
import unidades2 = Celula_PEM_3.unidades_ext;
import constantes = Modelica.Constants;

annotation (
  Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],
    grid=[2, 2]),
  Icon(
    Ellipse(extent=[-80,40; 80,-60], style(
      color=3,
      rgbcolor={0,0,255},
      gradient=2,
      fillColor=85,
      rgbfillColor={255,28,73})),
    Ellipse(extent=[-40,20; 40,-80], style(
      color=3,
      rgbcolor={0,0,255},
      gradient=1,
      fillColor=45,
      rgbfillColor={255,170,51})),
    Rectangle(extent=[-100,80; 100,40], style(
      color=3,
      rgbcolor={0,0,255},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170})),
    Text(
      extent=[-100,80; 100,40],
      style(
        color=3,
        rgbcolor={0,0,255},
        gradient=2,
        fillColor=85,
        rgbfillColor={255,14,78},
        fillPattern=7),
      string="Prácticas de instrumentación y control")),
  Documentation(
    info="<html>
    <br><br>
    <H2 align=center>Máster en ingeniería de control y sistemas</H2>
    <H2 align=center>UNED - UCM</H2>
    <H4 align=center>Versión 1.2 el 29 febrero 2012</H4><br><br><br><br>"
```

```
<b>Autor</b><br><br>
<pre>
  Enrique Martínez Varas<br>
  email: <A
  HREF="mailto:E.M.VARAS@telefonica.net">e.m.varas@telefonica.net</A><BR>
</pre>
```

```
</html>"),
uses(Modelica(version="2.2.1")),
version="1.2");
```

```
package unidades_ext
```

```
"En la librería de modelica faltan algunas unidades, esto corrige esa carencia."
```

```
type porosidad = Real (final quantity="Porosidad", final unit = "1")
"Porosidad"
annotation (Documentation(info="<html>
  La porosidad de un elemento definido, es la fracción de volumen ocupado por dicho
  elemento. Define pues el cociente entre su volúmen y el volumen total.<br>
  Es una cantidad de cero a uno adimensional.<br><br>
  De ese modo, la porosidad de los poros es el cociente entre el volumen de los poros y
  el volumen total.<br>
  Igualmente la porosidad del sólido sería la fracción entre el volumen de sólido y el
  volumen total.<br>
  La suma de las dos cantidades anteriores es igual a la unidad.
</html>"));
```

```
type tortuosidad = Real (final quantity="Tortuosidad", final unit = "1")
"Tortuosidad"
annotation (Documentation(info=
  "<html>
  La tortuosidad hace referencia a la forma más o menos retorcida del volumen de los
  poros, define así la dificultad para ser atravesado por difusión.<br>
  Es una cantidad adimensional mayor que uno.
</html>"));
```

```
type superficie_condensacion = Real (final quantity="Superficie específica de
condensación", final unit = "1/m")
"Superficie específica de condensación" annotation (Documentation(info=
  "<html>
  La superficie específica de condensación es la superficie disponible para
  condensación en cada unidad de volúmen,<br>
  define así la cantidad de área que tiene en su interior un material poroso.<br>
  Expresado en m^2/m^3.
</html>"));
```

```
type transferencia_materia = Real (final quantity="Coeficiente de transferencia de
materia", final unit = "m/s")
"Coeficiente de transferencia de materia" annotation (Documentation(info=
  "<html>
```

Es la efectividad con la que se condensa el agua vapor en la superficie de condensación.<br>

Expresado en unidades m/s.

</html>"));

```
type carga_agua = Real (final quantity="Carga de agua", final unit = "1")
```

```
"Carga de agua"
```

```
annotation (Documentation(info=
```

```
"<html>
```

La carga de agua es un indicador de lo llenos de agua líquida que están los poros,<br>

indica la relación entre la masa de agua líquida y la masa de la membrana, sólo el material sólido de la membrana.<br>

Es una cantidad adimensional mayor o igual que cero.

</html>"));

```
type moles = Real (final quantity="Número de moles", final unit="mol")
```

```
"Numero de moles" annotation (Documentation(info=
```

```
"<html>
```

Número de moles = masa / masa\_molecular, expresado en mol.

</html>"));

```
type Fneto = Real (final quantity="Flujo molar neto", final unit="mol/s")
```

```
"Flujo neto" annotation (Documentation(info=
```

```
"<html>
```

Flujo neto molar en moles por segundo.

</html>"));

```
type Cneta = Real (final quantity="Corriente molar neta", final unit="mol/s.m2")
```

```
"Corriente neta"
```

```
annotation (Documentation(info=
```

```
"<html>
```

Flujo neto molar por unidad de superficie; en moles por segundo.

</html>"));

```
type concentracion_molar = Real (final quantity="Concentración molar", final unit = "mol/m3")
```

```
"Concentracion molar"
```

```
annotation (Documentation(info="<html>
```

```
Número de moles por unidad de volumen. <br>
```

```
Expresado en moles/metro cúbico.
```

</html>"));

```
type generacion = Real (final quantity="Velocidad de generación molar", final unit = "mol/s")
```

```
"Velocidad de generación molar"
```

```
annotation (Documentation(info="<html>
```

```
Número de moles de una especie generados por unidad de tiempo. <br>
```

```
Expresado en moles/segundo.
```

</html>"));

```
type generacion_electrica = Real (final quantity="Velocidad de generación
eléctrica", final unit = "c/s")
"Velocidad de generación de carga eléctrica"
annotation (Documentation(
info="<html>Define las unidades con que se genera carga eléctrica a partir de la
reacción electroquímica.<br>
Este término será negativo indicando en realidad que la carga se gasta en la
reacción.<br>
Está expresado en culombios por segundo, o equivalentemente en amperios.
</html>"));
```

```
type densidad_generacion_electrica = Real (final quantity="densidad de generación
eléctrica", final unit = "c/s.m3")
"Densidad de generación eléctrica"
annotation (Documentation(info="<html>Es la generación de
carga eléctrica por unidad de tiempo y de volumen.
Está relacionado con la generación eléctrica.<br>
Se define en unidades: culombio / segundo metro cúbico, o equivalentemente en
amperios / metro cúbico.
</html>"));
```

```
type entalpia_molar = Real (final quantity="Entalpía molar de vaporización", final
unit = "J/mol")
"Entalpía molar de vaporización" annotation (Documentation(info=
"<html>
Es el cambio de entalpía que acompaña al proceso de evaporación.<br>
Expresado en J/mol.
</html>"));
```

```
type constante_gas_ideal = Real (final quantity="Constante de los gases ideales",
final unit = "J/K.mol")
"Constante de Boltzmann" annotation (Documentation(info=
"<html>
Constante de los gases ideales = 8.3145 [J/K.mol]
</html>"));
```

```
type hidratacion = Real (final quantity="Hidratación", final unit = "1")
"Índice de hidratación del Nafión"
annotation (Documentation(info=
"<html>
La hidratación del Nafión es un número del cero al 14, correspondiendo con una
humedad relativa del cero al 100%. Varía de forma no lineal. [1]
</html>"));
```

```
type humedad_relativa = Real (final quantity="Humedad relativa", final unit = "1")
"Humedad relativa"
annotation (Documentation(info=
"<html>
```

La humedad relativa del Nafión es un número del cero al 100, correspondiendo con una presión relativa del cero al 100% con respecto a la presión de saturación del vapor de agua. [1]

```
</html>"));
```

```
type solvatacion = Real (final quantity="Índice de solvatación", final unit = "1")
"Índice de solvatación del H+ en el NAFION"
annotation (Documentation(info=
"<html>
```

La solvatación del H+ en el NAFION es un número positivo en el entorno de 5, correspondiendo la cantidad de moléculas de agua que solvatan al hidrógeno.

Estas moléculas de agua son arrastradas junto con el hidrógeno en lo que se denomina corriente electrosmótica. [1]

```
</html>"));
```

```
end unidades_ext;
```

```
package piezas
```

```
"Contiene los modelos de la difusion de varias especies gaseosas y corrientes electricas"
```

```
connector nexo
```

```
"Punto por el que cruzan las especies hacia y desde los elementos implicados"
```

```
unidades.Pressure Po2(displayUnit="Pa");
unidades.Pressure Ph2(displayUnit="Pa");
unidades.Pressure Ph2og(displayUnit="Pa");
unidades.Pressure Psath2o(displayUnit="Pa");
unidades2.concentracion_molar Ch2ol;
unidades.Temperature T;
unidades2.porosidad EPSILONg "disponible para los gases";
unidades.ElectricPotential Ve;
unidades.ElectricPotential Vp;
unidades.ElectricPotential Vo2;
unidades.ElectricPotential Vh2;
unidades.ElectricPotential Vact;
unidades.ElectricPotential SPo2;
unidades.ElectricPotential SPh2;
unidades.ElectricPotential SPact;
unidades.ElectricPotential E;
unidades.ElectricPotential Eernst;
unidades.ElectricCurrent Ilinea;
```

```
flow unidades2.Fneto Fo2;
flow unidades2.Fneto Fh2;
flow unidades2.Fneto Fh2og;
flow unidades2.Fneto Fh2ol;
flow unidades.ElectricCurrent Ie;
flow unidades.EnergyFlowRate Fj;
flow unidades.EnergyFlowRate Fcond;
flow unidades.EnergyFlowRate Fc1;
flow unidades.EnergyFlowRate Fc2;
```

annotation (Documentation(info="<html>

<br><br><br>

El nexo es el punto de los volúmenes de control que lo vincula con otros elementos.<br>

También es el punto de los modelos de transporte por el que entran y salen los gases.<br>

Además debe permitir el paso de la corriente eléctrica y las transferencias de calor, así como los datos necesarios para confeccionar la pila.<br><br>

Tan sólo hay un tipo de nexo que se emplea para el volumen de control y para el fenómeno de transporte.<br><br>

Está compuesto por:<br><br>

Variables across(transversales):<br>

<pre>

Presión de oxígeno ( $P_{O_2}$ )<br>

Presión de vapor de agua ( $P_{H_2Og}$ )<br>

Presión de saturación del vapor de agua ( $P_{sath2o}$ )<br>

Concentración molar de agua líquida ( $Ch_{2ol}$ )<br>

Temperatura (T)<br>

Porosidad ocupada por gases (fracción de gases) ( $\epsilon_g$ )<br>

Sobrepotencial eléctrico integrado, generado por la circulación de electrones en un medio resistente. ( $V_e$ ).<br>

Sobrepotencial eléctrico integrado, generado por la circulación de protones en un medio resistente. ( $V_p$ ).<br>

Sobrepotencial por depresión de oxígeno integrado, en la reacción electroquímica. ( $V_{O_2}$ ).<br>

Sobrepotencial de activación integrado, en bornes de la pila. ( $V_{act}$ ).<br>

Sobrepotencial por depresión de oxígeno puntual, del volumen de control. ( $SP_{O_2}$ ).<br>

Sobrepotencial por depresión de hidrógeno puntual, del volumen de control. ( $SP_{H_2}$ ).<br>

( $SP_{O_2}$ ).<br>

Sobrepotencial de activación puntual, en el volumen de control. ( $SP_{act}$ ).<br>

Potencial de Nernst puntual de la reacción electroquímica en el volumen de control. (E).<br>

(E).<br>

Potencial de Nernst integrado de la reacción electroquímica en la pila. ( $E_{ernst}$ ).<br>

( $E_{ernst}$ ).<br>

Intensidad de la corriente eléctrica de referencia que cruza la pila. ( $I_{linea}$ ).<br>

</pre>

Variables through(longitudinales):<br>

<pre>

Flujo neto molar del oxígeno ( $F_{O_2}$ )<br>

Flujo neto molar del vapor de agua ( $F_{H_2Og}$ )<br>

Flujo neto molar del agua líquida ( $F_{H_2ol}$ )<br>

Intensidad de la corriente eléctrica para los electrones. ( $I_e$ )<br>

Generación térmica por efecto Joule originado por las conducciones electrónica y protónica. ( $F_j$ ).<br>

Flujo térmico por conducción. ( $F_{cond}$ ).<br>

Flujo térmico por convección del agua líquida. ( $F_{c1}$ ).<br>

Flujo térmico por convección del vapor de agua. ( $F_{c2}$ ).<br>

```
</pre>
```

```
</html>"),  
  Coordsys(  
    extent=[-100, -100; 100, 100],  
    grid=[2, 2]),  
  Icon(Ellipse(extent=[-60,-60; 60,60], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=30,  
    rgbfillColor={215,215,215})))));  
end nexo;
```

connector pin\_positivo "Equivalente al de la librería de Modelica"

```
annotation (Icon(  
  Ellipse(extent=[-60,-60; 60,60], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=1,  
    rgbfillColor={255,0,0}))), Documentation(info="<html>  
Se trata del terminal positivo de la pila.<br><br>  
Es compatible con la librería estándar eléctrica de modelica.  
</html>"));
```

```
  unidades.Voltage v "Potencial eléctrico";  
  flow unidades.Current i "Corriente eléctrica";
```

```
end pin_positivo;
```

connector pin\_negativo "Equivalente al de la librería de Modelica"

```
annotation (Icon(  
  Ellipse(extent=[-60,-60; 60,60], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=3,  
    rgbfillColor={0,0,255}))), Documentation(info="<html>  
Se trata del terminal negativo de la pila.<br><br>  
Es compatible con la librería estándar eléctrica de modelica.  
</html>"));
```

```
  unidades.Voltage v "Potencial eléctrico";  
  flow unidades.Current i "Corriente eléctrica";
```

```
end pin_negativo;
```

```
model VC_catalitica
```

```
  "Modela gases, líquidos y corrientes, contenidos en un pequeño volumen"
```

```

nexo nexo1 annotation (extent=[-30,-110; 30,-50]);
annotation (Coordsys(
  extent=[-100, -100; 100, 100],
  grid=[2, 2]),
  Icon(Rectangle(extent=[-60,58; 60,-42], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215},
    fillPattern=1)),
  Rectangle(extent=[-2,-62; 2,-42], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
  Text(
    extent=[-100,60; 100,100],
    string="%name",
    style(
      color=58,
      rgbcolor={0,127,0},
      fillColor=30,
      rgbfillColor={215,215,215},
      fillPattern=1))),
  DymolaStoredErrors,
  Documentation(info="<html>

```

El volumen de control es la unidad mínima en la que dividimos el material.<br>

Tiene un único conector por el que entran o salen los gases al volumen.<br>

El flujo es positivo cuando el gas o la corriente entran en el volumen.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de evolución de las variables de estado:<br>

```
<pre>
```

$$\text{der}(\text{No2}) = \text{Fo2} + \text{Greaco2}$$

$$\text{der}(\text{Nh2og}) = \text{Fh2og} + \text{Gh2og} + \text{Greach2og}$$

$$\text{der}(\text{Nh2ol}) = \text{Fh2ol} + \text{Gh2ol}$$

$$\text{der}(T) = (\text{Fconv} + \text{Fcond} + \text{Gt} + \text{Gv}) / (\text{Cp} * \text{RHOS} * \text{Svc} * \text{Lvc})$$

```
</pre>
```

Ecuaciones de la temperatura:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Gt} = \text{Ilinea} * \text{SPact} + \text{Gj}$$

$$\text{Fconv} = \text{Fconv1} + \text{Fconv2}$$

```
</pre>
```

Ecuaciones de cálculo de los sobrepotenciales:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Ge} = -\text{Ilinea} / \text{NUMvc}$$

$$\text{Greaco2} = \text{Ge} / (4 * \text{F})$$

$$\text{Greach2og} = -\text{Ge} / (2 * \text{F})$$

$$\text{Ie} = -\text{Ge}$$

$$\text{Pxo2} = (1 - \text{CHIrel}) * \text{Po2}$$

```

SPo2max = ((C1*Modelica.Math.exp((P0o2/(Pcorte-Pinf))-C2) - C3)/A)/NUMvc
SPact = B*Modelica.Math.log(1+(Ilinea/AactI0ref))/NUMvc
SPo2 = if noEvent(Pxo2 mi Pcorte) then SPo2max
      else ((C1*Modelica.Math.exp((P0o2/(Pxo2-Pinf))-C2) - C3) / A)/NUMvc

```

</pre>

Cálculo del potencial de Nernst:<br>

```

<pre>

```

```

E = -((DELTAh/(2*F))-(DELTAh/(2*F))*T)/NUMvc

```

</pre>

Ecuaciones referentes al agua líquida:<br>

```

<pre>

```

```

Nh2ol = Mh2ol/Mh2o

```

```

Vh2ol = Mh2ol/RHOh2ol

```

```

Ch2ol = Nh2ol/Vvc

```

```

CHI = Mh2ol/Ms

```

```

CHIImax = RHOh2ol*Vporos/Ms

```

```

CHIrel = CHI/CHIImax

```

```

Nh2ol_max = RHOh2ol*Vporos/Mh2o

```

```

Ch2ol_max = Nh2ol_max/Vvc

```

```

Ms = Vvc*RHOs

```

```

Gh2ol = Vg*ALFAv*BETA*(Ph2og-Psath2o)/(R*T)

```

```

Gh2og = -Gh2ol

```

```

Psath2o = P0sath2o*Modelica.Math.exp((T-T0sat)*Lv/(R*T*T0sat))

```

```

Lv = 3.1192e4+1.854018e2*T-8.05959e-1*T^2+1.379322e-3*T^3-9.9104399e-7*T^4

```

```

Gv = -Lv*Gh2og

```

</pre>

Ecuaciones de estado de los gases en condiciones ideales:<br>

```

<pre>

```

```

Po2*Vg = No2*R*T

```

```

Ph2og*Vg = Nh2og*R*T

```

</pre>

Ecuaciones que caracterizan geoméricamente el material poroso:<br>

```

<pre>

```

```

Vvc = Svc*Lvc

```

```

Lvc = Ltot/NUMvc

```

```

EPSILONporos = Vporos/Vvc

```

```

EPSILONg = Vg/Vvc

```

```

Vporos = Vg+Vh2ol

```

</pre>

Ecuaciones que importan desde el conector:<br>

```

<pre>

```

```

Fo2 = nexo1.Fo2

```

```

Fh2og = nexo1.Fh2og

```

```

Fh2ol = nexo1.Fh2ol

```

```

Ilinea = nexo1.Ilinea

```

```

Vact = nexo1.Vact

```

```

Vo2 = nexo1.Vo2

```

```

Ve = nexo1.Ve

```

```

Vp = nexo1.Vp

```

```

Gj = nexo1.Fj

```

```
Fcond = nexo1.Fcond
Fconv1 = nexo1.Fc1
Fconv2 = nexo1.Fc2
```

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia el conector:<br>

```
<pre>
```

```
nexo1.Po2 = Po2
nexo1.Ph2og = Ph2og
nexo1.Psath2o = Psath2o
nexo1.Ch2ol = Ch2ol
nexo1.T = T
nexo1.EPSILONg = EPSILONg
nexo1.SPact = SPact
nexo1.SPo2 = SPo2
nexo1.Ie = -Ie
nexo1.E = E
```

```
</pre>
```

</html>", revisions="<html> Con respecto a la ecuación de la presión de saturación del agua (Clasius-Clapeiron integrada):<br>

```
Psath2o = P0sath2o*Modelica.Math.exp(((1/T0sat)-(1/T))*Lv*Mh2o/R)<br>
```

Tras una consulta con Alfonso Urquia 27/7/2011, eliminamos la masa molecular del agua Mh2o de la fórmula debido a que es dimensionalmente inconsistente, se trata de una errata.<br><br>

Se ha cambiado el valor de la superficie de condensación por el de ALFAv = 1e-2; debido a que se planteaba un valor demasiado elevado.<br><br>

La generación de agua líquida (Gh2ol) se hace proporcional a Vg y no a Vvc.<br><br>

La fórmula que daba la evolución de la entalpía de vaporización daba resultados irreales. La definitiva es  $L_v = 3.1192e4 + 1.854018e2 * T - 8.05959e-1 * T^2 + 1.379322e-3 * T^3 - 9.9104399e-7 * T^4$ .<br><br>

También se exporta el valor de EPSILONg para calcular la difusión de los gases en el modelo transporte\_x\_difusion.<br><br>

En la última versión (1.1), se incluyen los cálculos de los sobrepotenciales de activación y subpresión (concentración) de oxígeno, de forma separada.<br>

También se inicializan los valores de algunas variables en una nueva sección inicial equation.

En la versión (1.2), se incluyen las ecuaciones con la dinámica de la temperatura en función de los flujos conductivo y convectivo, además de la energía de vaporización del agua líquida. Por eso el parámetro temperatura ahora referencia a la temperatura inicial de la pila.

```
</html>"));
```

```
constant unidades2.constante_gas_ideal R = constantes.R;
constant unidades.FaradayConstant F=96485;
```

```
parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;
parameter unidades.Density RHOh2ol=972;
parameter unidades.Density RHOs=4000;
parameter unidades.Temp_K T0=353;
parameter unidades.Temp_K T0sat=298.16;
parameter unidades2.porosidad EPSILONporos=0.4;
```

parameter unidades.Length Ltot=4e-5;  
parameter unidades.Area Svc=1;  
parameter unidades2.superficie\_condensacion ALFAv=1e-2;  
parameter unidades2.transferencia\_materia BETA=1e-3;  
parameter unidades2.carga\_agua CHIinicial=0.01;  
parameter unidades2.moles No2inicial=1e-5;  
parameter unidades2.moles Nh2inicial=0;  
parameter unidades2.moles Nh2oginicial=1e-7;  
parameter unidades.Pressure P0sath2o=3169;  
parameter unidades.Pressure P0o2=1e5;  
parameter unidades2.densidad\_generacion\_electrica AactI0ref=1.2;  
parameter unidades.ElectricPotential B=0.04;  
parameter unidades.ElectricPotential C1=1;  
parameter Real C2=2.5 "1";  
parameter unidades.ElectricPotential C3=1;  
parameter unidades.Pressure Pcorte=65000;  
parameter unidades.Pressure Pinf = 52000;  
parameter Real A=6;  
parameter unidades2.entalpia\_molar DELTAh=-241818;  
parameter unidades.Entropy DELTAs=-42.5;  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=1047  
"polímero plástico (teflon)";  
parameter Real NUMvc=20 "Número de volúmenes de control";

unidades2.Fneto Fo2;  
unidades2.Fneto Fh2;  
unidades2.Fneto Fh2og;  
unidades2.Fneto Fh2ol;  
unidades2.moles No2;  
unidades2.moles Nh2;  
unidades2.moles Nh2og;  
unidades2.moles Nh2ol;  
unidades2.moles Nh2ol\_max;  
unidades2.concentracion\_molar Ch2ol;  
unidades2.concentracion\_molar Ch2ol\_max;  
unidades2.generacion Gh2og;  
unidades2.generacion Gh2ol;  
unidades2.generacion Greaco2;  
unidades2.generacion Greach2og;  
unidades2.generacion\_electrica Ge;  
unidades.EnergyFlowRate Gt;  
unidades.EnergyFlowRate Gj;  
unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv2;  
unidades.EnergyFlowRate Gv;  
unidades.ElectricPotential Vact;  
unidades.ElectricPotential SPact;  
unidades.ElectricPotential Vo2;

unidades.ElectricPotential Vh2;  
 unidades.ElectricPotential SPo2;  
 unidades.ElectricPotential SPh2;  
 unidades.ElectricPotential Ve;  
 unidades.ElectricPotential Vp;  
 unidades.ElectricPotential SPo2max;  
 unidades.ElectricPotential SPh2max;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential Enernst;  
 unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;  
 unidades2.entalpia\_molar Lv;  
 unidades.Mass Mh2ol;  
 unidades.Mass Ms;  
 unidades.Volume Vh2ol;  
 unidades.Volume Vg;  
 unidades.Volume Vporos;  
 unidades.Volume Vvc;  
 unidades.Length Lvc;  
 unidades2.porosidad EPSILONg;  
 unidades2.carga\_agua CHI;  
 unidades2.carga\_agua CHImax;  
 unidades2.carga\_agua CHIrel;  
 unidades.Pressure Po2;  
 unidades.Pressure Ph2;  
 unidades.Pressure Pxo2;  
 unidades.Pressure Ph2og;  
 unidades.Pressure Psath2o;  
 unidades.Temp\_K T;

equation

der(No2) = Fo2+Greaco2; //-----

-----Evolución de las variables de estado de los gases

der(Nh2og) = Fh2og+Gh2og+Greach2og;

der(Nh2ol) = Fh2ol+Gh2ol;

der(Nh2) = Fh2;

der(T) = (Fconv+Fcond+Gt+Gv)/(Cp\*RHOs\*Svc\*Lvc); //-----

-----Evolución de la temperatura

Gt = Ilinea\*SPact+Gj;

Fconv = Fconv1+Fconv2;

Ge = -Ilinea/NUMvc; //-----

-----Cálculo de los sobrepotenciales de activación y depresión de oxígeno

Greaco2 = Ge/(4\*F);

Greach2og = -Ge/(2\*F);

Ie = -Ge;

Pxo2 = (1-CHIrel)\*Po2;

SPo2max = ((C1\*Modelica.Math.exp((P0o2/(Pcorte-Pinf))-C2) - C3)/A)/NUMvc;

```

SPh2max = 0;
SPact = B*Modelica.Math.log(1+(Ilinea/AactI0ref))/NUMvc;
SPo2 = if noEvent(Pxo2<=Pcorte) then SPo2max else
      ((C1*Modelica.Math.exp((P0o2/(Pxo2-Pinf))-C2) - C3) /
A)/NUMvc;
  SPh2 = 0;

  E = -((DELTAh/(2*F))-(DELTAh/(2*F))*T)/NUMvc; //-----
-----Cálculo del potencial de Nernst

  Nh2ol = Mh2ol/Mh2o; //-----
-----Agua líquida
  Vh2ol = Mh2ol/RHOH2ol;
  Ch2ol = Nh2ol/Vvc;
  CHI = Mh2ol/Ms;
  CHImax = RHOH2ol*Vporos/Ms;
  CHIrel = CHI/CHImax;
  Nh2ol_max = RHOH2ol*Vporos/Mh2o;
  Ch2ol_max = Nh2ol_max/Vvc;
  Ms = Vvc*RHOH2o;
  Gh2ol = Vg*ALFAv*BETA*(Ph2og-Psath2o)/(R*T);
  Gh2og = -Gh2ol;
  Psath2o = P0sath2o*Modelica.Math.exp((T-T0sat)*Lv/(R*T*T0sat));
  Lv = 3.1192e4+1.854018e2*T-8.05959e-1*T^2+1.379322e-3*T^3-9.9104399e-
7*T^4;
  Gv = -Lv*Gh2og;

  Po2*Vg = No2*R*T; //-----
-----Ecuaciones de estado de los gases
  Ph2og*Vg = Nh2og*R*T;
  Ph2*Vg = Nh2*R*T;

  Vvc = Svc*Lvc; //-----
-----Caracterización geométrica del material
  Lvc = Ltot/NUMvc;
  EPSILONporos = Vporos/Vvc;
  EPSILONg = Vg/Vvc;
  Vporos = Vg+Vh2ol;

  Fo2 = nexo1.Fo2; //-----
----Importamos desde el conector
  Fh2 = nexo1.Fh2;
  Fh2og = nexo1.Fh2og;
  Fh2ol = nexo1.Fh2ol;
  Ilinea = nexo1.Ilinea;
  Vact = nexo1.Vact;
  Vo2 = nexo1.Vo2;
  Vh2 = nexo1.Vh2;
  Ve = nexo1.Ve;
  Vp = nexo1.Vp;

```

```
Gj = nexo1.Fj;
Fcond = nexo1.Fcond;
Fconv1 = nexo1.Fc1;
Fconv2 = nexo1.Fc2;
nexo1.Eernst = Eernst;
```

```
nexo1.Po2 = Po2; //-----
----Exportamos al conector
nexo1.Ph2 = Ph2;
nexo1.Ph2og = Ph2og;
nexo1.Psath2o = Psath2o;
nexo1.Ch2ol = Ch2ol;
nexo1.T = T;
nexo1.EPSILONg = EPSILONg;
nexo1.SPact = SPact;
nexo1.SPo2 = SPo2;
nexo1.SPh2 = SPh2;
nexo1.Ie = -Ie;
nexo1.E = E;
```

initial equation

```
CHI = CHIinicial;
No2 = No2inicial;
Nh2 = Nh2inicial;
Nh2og = Nh2oginicial;
T = T0;
```

end VC\_catalitica;

model TD\_catalitica

"Transporte por difusion de dos gases, un liquido y corrientes, en un medio poroso."

```
nexo nexo1 "A"
    annotation (extent=[-100,-20; -60,20]);
nexo nexo2 "B"
    annotation (extent=[60,-20; 100,20]);
annotation (Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],
    grid=[2, 2]),
    Icon(Polygon(points=[-66,0; -40,40; -40,20; 40,20; 40,40; 66,0; 40,
    -40; 40,-20; -40,-20; -40,-40; -66,0],
    style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
    Text(
    extent=[-80,-80; 80,-60],
    style(
```

```

        color=58,
        rgbcolor={0,127,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215},
        fillPattern=1),
string="%name"),
Text(
    extent=[-90,30; -70,50],
    string="A",
    style(
        color=42,
        rgbcolor={127,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1)),
Text(
    extent=[70,30; 90,50],
    style(
        color=42,
        rgbcolor={127,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1),
    string="B"),
Text(
    extent=[-22,-10; -2,10],
    style(
        color=42,
        rgbcolor={127,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1),
    string="+"),
Line(points=[-2,0; 18,0; 12,4; 12,-4; 18,0], style(
    color=42,
    rgbcolor={127,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170},
    fillPattern=1))),

```

Diagram,

DymolaStoredErrors,

Documentation(info="<html>

El fenómeno de transporte describe la difusión de dos gases, un líquido y las corrientes electrónica y protónica, a través de un material poroso.<br>

Tiene dos conectores que representan las superficies de los volúmenes de control (superficies de control).<br>

El flujo es positivo cuando las especies cruzan desde A hacia B.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de caracterización geométrica del material:<br>

<pre>

$$L_{vc} = L_{tot}/NUM_{vc}$$

$$EPSILON_g = \sqrt{(E_{g1}^2 + E_{g2}^2)/2}$$

</pre>

Ecuaciones referentes a la difusión binaria:<br>

<pre>

$$P_g = P_{o2} + P_{h2og}$$

$$T_g = (T_1 + T_2)/2$$

$$Do_{2h2og} = Do_{2h2og\_ref} * (P_g/P_{g\_ref}) * ((T_g/T_{g\_ref})^{1.5})$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del agua líquida:<br>

<pre>

$$F_{12h2ol} = S_{vc} * Dh_{2ol} * (C_1 - C_2)/L_{vc}$$

$$F_{12eo} = 5 * I_p / F$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del oxígeno:<br>

<pre>

$$P_{o2} = \sqrt{(P_{o2vc1}^2 + P_{o2vc2}^2)/2}$$

$$(P_{o2vc1} - P_{o2vc2})/L_{vc} = R * T_g * (TAU^2) * ((1/Do_{2k}) + (1/Do_{2h2og})) * J_{o2} / EPSILON_g$$

$$F_{12o2} = J_{o2} * S_{vc}$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del vapor de agua:<br>

<pre>

$$P_{h2og} = \sqrt{(P_{h2ogvc1}^2 + P_{h2ogvc2}^2)/2}$$

$$P_{sath2o} = \sqrt{(P_{sath2ovc1}^2 + P_{sath2ovc2}^2)/2}$$

$$J_{h2og} = (P_{h2ogvc1} - P_{h2ogvc2}) * EPSILON_g * Dh_{2ogk} * Do_{2h2og} / (L_{vc} * (TAU^2) * R * T_g * (Do_{2h2og} + Dh_{2ogk}))$$

$$F_{12h2og} = J_{h2og} * S_{vc}$$

</pre>

Ecuaciones de cálculo de los sobrepotenciales ohmicos:<br>

<pre>

$$SP_e = (I_e * L_{vc}) / (S_{vc} * SIGMA_e * EPSILON_s)$$

$$V_{e2} = V_{e1} + SP_e$$

$$I_p = I_{linea} - I_e$$

$$ALFA = P_{h2og} / P_{sath2o}$$

$$LAMBDA_m = 0.043 + 17.81 * ALFA - 39.85 * (ALFA)^2 + 36 * (ALFA)^3$$

$$b_1 = b_{11} * LAMBDA_m - b_{12}$$

$$K_p = b_1 * Modelica.Math.exp(b_2 * ((T_g - t_2)/(T_g * t_2)))$$

$$SP_p = (I_p * L_{vc}) / (S_{vc} * K_p * EPSILON_e)$$

$$V_{p2} = V_{p1} + SP_p$$

</pre>

Ecuaciones de integración de los sobrepotenciales de activación y subpresión (concentración) de oxígeno:<br>

<pre>

$$V_{act\_2} = V_{act\_1} + SP_{act}$$

$$V_{o2\_2} = V_{o2\_1} + SP_{o2}$$

</pre>

Integración del potencial de Nernst:<br>

<pre>

$$E_2 = E_1 + E$$

</pre>

Ecuaciones del efecto Joule:<br>

<pre>

$$G_p = I_p * S_{pp}$$

$$G_e = I_e * S_{pe}$$

$$G = (G_p + G_e) / 2$$

</pre>

Ecuaciones de conducción y convección térmicas:<br>

<pre>

$$F_{cond} = \sigma_{at} * S_{vc} * (T_1 - T_2) / L_{vc}$$

$$F_{conv1} = \text{if noEvent}(F_{12h2ol} >= 0) \text{ then } C_p * F_{12h2ol} * M_{h2o} * (T_1 - T_2) \text{ else } C_p * F_{12h2ol} * M_{h2o} * (T_2 - T_1)$$

$$F_{conv2} = \text{if noEvent}(F_{12h2og} >= 0) \text{ then } C_{pv} * F_{12h2og} * M_{h2o} * (T_1 - T_2) \text{ else } C_{pv} * F_{12h2og} * M_{h2o} * (T_2 - T_1)$$

</pre>

Ecuaciones que importan desde los conectores:<br>

<pre>

$$C_1 = \text{nexo1.Ch2ol}$$

$$C_2 = \text{nexo2.Ch2ol}$$

$$Po_{2vc1} = \text{nexo1.Po2}$$

$$Po_{2vc2} = \text{nexo2.Po2}$$

$$Ph_{2ogvc1} = \text{nexo1.Ph2og}$$

$$Ph_{2ogvc2} = \text{nexo2.Ph2og}$$

$$Ps_{ath2ovc1} = \text{nexo1.Psath2o}$$

$$Ps_{ath2ovc2} = \text{nexo2.Psath2o}$$

$$T_1 = \text{nexo1.T}$$

$$T_2 = \text{nexo2.T}$$

$$E_{g1} = \text{nexo1.EPSILONg}$$

$$E_{g2} = \text{nexo2.EPSILONg}$$

$$I_{linea} = \text{nexo2.Ilinea}$$

$$I_e = \text{nexo1.Ie}$$

$$V_{e1} = \text{nexo1.Ve}$$

$$V_{p1} = \text{nexo1.Vp}$$

$$V_{act\_1} = \text{nexo1.Vact}$$

$$V_{o2\_1} = \text{nexo1.Vo2}$$

$$S_{Pact} = \text{nexo1.SPact}$$

$$S_{Po2} = \text{nexo1.SPo2}$$

$$E = \text{nexo1.E}$$

$$E_1 = \text{nexo1.Eernst}$$

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia los conectores:<br>

<pre>

$$\text{nexo1.Fh2ol} = F_{12h2ol}$$

$$\text{nexo2.Fh2ol} = -F_{12h2ol}$$

$$\text{nexo1.Fo2} = F_{12o2}$$

$$\text{nexo2.Fo2} = -F_{12o2}$$

$$\text{nexo1.Fh2og} = F_{12h2og}$$

$$\text{nexo2.Fh2og} = -F_{12h2og}$$

$$\text{nexo1.Ilinea} = I_{linea}$$

$$\text{nexo2.Ie} = -I_e$$

```

nexo2.Ve = Ve2
nexo2.Vp = Vp2
nexo2.Vact = Vact_2
nexo2.Vo2 = Vo2_2
nexo2.Enernst = E2
nexo1.Fj = -G
nexo2.Fj = -G
nexo1.Fcond = Fcond
nexo2.Fcond = -Fcond
nexo1.Fc1 = Fconv1
nexo2.Fc1 = -Fconv1
nexo1.Fc2 = Fconv2
nexo2.Fc2 = -Fconv2

```

</pre>

Además de los siguientes parámetros:

</html>", revisions="<html>En lo referente a la porosidad del material, en este texto la denominación EPSILONporos.<br>

En el guión de prácticas se denomina también EPSILONs.<br>

Los valores para los parámetros que faltaban en el guión son los siguientes:<br>

<pre>

Dh2ol = 3.5e-11(m2/s)<br>

Do2h2og\_ref = 2.82e-3(m2/s)<br>

Pg\_ref = 1e5(Pa)<br>

Tg\_ref = 308.1(°K)<br>

</pre><br>

Incorpora la importación de EPSILONg para calcular la difusión de los gases.<br>

Se ha cambiado la expresión de la presión de los gases desde una fórmula basada en eventos, a otra basada en la media cuadrática.

Eso incrementará el rendimiento.<br>

Se han incorporado los cálculos de sobrepotencial de activación y subpresión de oxígeno (versión 1.1).

En la versión 1.2, se incluyen las ecuaciones de conducción y convección térmicas.

También se ha intentado disminuir el número de descripciones basadas en eventos.

Se incluyen nuevos fenómenos tales como el fenómeno de arrastre electroosmótico, la variación del potencial en función de la temperatura o la variación de la conductividad protónica en función de la humedad del Nafion.

</html>"));

constant unidades2.constante\_gas\_ideal R = constantes.R;

constant unidades.FaradayConstant F=96485;

parameter unidades.Area Svc=1;

parameter unidades.Length Ltot=4e-5;

parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ol=2.5e-11;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Do2h2og\_ref=2.82e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Do2k=7.853e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ogk=1.047e-3;

parameter unidades2.porosidad EPSILONs=0.6;

parameter unidades2.porosidad EPSILONe=0.2;

parameter unidades.Pressure Pg\_ref(displayUnit="Pa")=1e5;  
parameter unidades.Temp\_K Tg\_ref=308.1;  
parameter unidades2.tortuosidad TAU=5;  
parameter unidades.Conductivity SIGMAe=1;  
parameter unidades.ThermalConductivity SIGMA<sub>t</sub>=0.0586;  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=4181 "agua líquida";  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cpv=2080 "agua vapor";  
parameter unidades.Conductivity b11=0.5139;  
parameter unidades.Conductivity b12=0.3260;  
parameter unidades.Temp\_K b2=1268;  
parameter unidades.Temp\_K t2=303;  
parameter unidades2.solvatacion S=5;  
parameter Real NUMvc=20 "Numero de volúmenes de control";

unidades2.concentracion\_molar C1;  
unidades2.concentracion\_molar C2;  
unidades.DiffusionCoefficient Do2h2og;  
unidades2.Fneto F12h2ol;  
unidades2.Fneto F12o2;  
unidades2.Fneto F12h2;  
unidades2.Fneto F12h2og;  
unidades2.Fneto F12eo;  
unidades2.Cneta Jo2;  
unidades2.Cneta Jh2;  
unidades2.Cneta Jh2og;  
unidades.Pressure Po2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Po2vc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Po2vc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2vc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2vc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2og( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2ogvc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2ogvc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Psath2o( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Psath2ovc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Psath2ovc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Pg(displayUnit="Pa");  
unidades.Temperature Tg;  
unidades.Temperature T1;  
unidades.Temperature T2;  
unidades.Length Lvc;  
unidades2.porosidad Eg1;  
unidades2.porosidad Eg2;  
unidades2.porosidad EPSILONg;  
unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
unidades.ElectricCurrent Ip;  
unidades.ElectricPotential SPe;  
unidades.ElectricPotential Ve1;  
unidades.ElectricPotential Ve2;

unidades.ElectricPotential Vp1;  
 unidades.ElectricPotential Vp2;  
 unidades.ElectricPotential SPp;  
 unidades.ElectricPotential SPact;  
 unidades.ElectricPotential SPo2;  
 unidades.ElectricPotential SPh2;  
 unidades.ElectricPotential Vo2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vo2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_2;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential E1;  
 unidades.ElectricPotential E2;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;  
 unidades.Conductivity Kp;  
 unidades.Conductivity b1;  
 unidades2.hidratacion LAMBDAm;  
 unidades2.humedad\_relativa ALFA;  
 unidades.EnergyFlowRate Gp;  
 unidades.EnergyFlowRate Ge;  
 unidades.EnergyFlowRate G;  
 unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv2;

equation

$Lvc = Ltot/NUMvc;$  //-----

-Caracterización geométrica del material

$EPSILONg = \sqrt{(Eg1^2 + Eg2^2)/2};$

$F12h2o1 = (Svc*Dh2o1*(C1-C2)/Lvc) + F12eo;$  //-----

-----Difusión del agua líquida

$F12eo = S*Ip/F;$

$Po2 = \sqrt{(Po2vc1^2 + Po2vc2^2)/2};$  //-----

-----Difusión del oxígeno

$Jo2 = (Po2vc1 -$

$Po2vc2)*EPSILONg*Do2k*Do2h2og/(Lvc*(TAU^2)*R*Tg*(Do2h2og + Do2k));$

$F12o2 = Jo2*Svc;$

$Ph2 = \sqrt{(Ph2vc1^2 + Ph2vc2^2)/2};$  //-----

-----Difusión del hidrógeno

$Jh2 = 0;$

$F12h2 = 0;$

$Ph2og = \sqrt{(Ph2ogvc1^2 + Ph2ogvc2^2)/2};$  //-----

-----Difusión del vapor de agua

$Psath2o = \sqrt{(Psath2ovc1^2 + Psath2ovc2^2)/2};$

$J_{h2og} = (Ph2ogvc1 - Ph2ogvc2) * \epsilon * Dh2og * Do2h2og / (Lvc * (\tau)^2 * R * Tg * (Do2h2og + Dh2ogk))$ ;  
);

$F_{12h2og} = J_{h2og} * Svc$ ;

$Pg = Po2 + Ph2og$ ; //-----  
Difusión binaria

$Tg = (T1 + T2) / 2$ ;

$Do2h2og = Do2h2og\_ref * (Pg / Pg\_ref) * ((Tg / Tg\_ref)^{1.5})$ ;

$SPe = (Ie * Lvc) / (Svc * \sigma_e * \epsilon_s)$ ; //-----  
-----Cálculo e integración de los sobrepotenciales ohmicos

$Ve2 = Ve1 + SPe$ ;

$Ip = I_{linea} - Ie$ ;

$ALFA = Ph2og / Psath2o$ ;

$LAMBDAm = 0.043 + 17.81 * ALFA - 39.85 * (ALFA)^2 + 36 * (ALFA)^3$ ;

$b1 = b11 * LAMBDAm - b12$ ;

$Kp = b1 * Modelica.Math.exp(b2 * ((Tg - t2) / (Tg * t2)))$ ;

$SPp = (Ip * Lvc) / (Svc * Kp * \epsilon_{Ne})$ ;

$Vp2 = Vp1 + SPp$ ;

$Vact\_2 = Vact\_1 + SPact$ ; //-----  
--Integración de los sobrepotenciales de activación y depresión.

$Vo2\_2 = Vo2\_1 + SPo2$ ;

$Vh2\_2 = Vh2\_1 + SPh2$ ;

$E2 = E1 + E$ ; //-----  
Integración del potencial de Nernst

$Gp = Ip * SPp$ ; //-----  
Efecto Joule

$Ge = Ie * SPe$ ;

$G = (Gp + Ge) / 2$ ;

$Fcond = \sigma_{At} * Svc * (T1 - T2) / Lvc$ ; //-----  
-----Conducción térmica

$Fconv1 = \text{if noEvent}(F_{12h2ol} >= 0) \text{ then } Cp * F_{12h2ol} * Mh2o * (T1 - T2) \text{ else } Cp * F_{12h2ol} * Mh2o * (T2 - T1)$ ; //---Convección

$Fconv2 = \text{if noEvent}(F_{12h2og} >= 0) \text{ then } Cpv * F_{12h2og} * Mh2o * (T1 - T2) \text{ else } Cpv * F_{12h2og} * Mh2o * (T2 - T1)$ ;

$C1 = nexo1.Ch2ol$ ; //-----  
Importamos

$C2 = nexo2.Ch2ol$ ;

$Po2vc1 = nexo1.Po2$ ;

$Po2vc2 = nexo2.Po2$ ;

$Ph2vc1 = nexo1.Ph2$ ;

$Ph2vc2 = nexo2.Ph2$ ;

```

Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og;
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og;
Psath2ovc1 = nexo1.Psath2o;
Psath2ovc2 = nexo2.Psath2o;
T1 = nexo1.T;
T2 = nexo2.T;
Eg1 = nexo1.EPSILONg;
Eg2 = nexo2.EPSILONg;
Ilinea = nexo2.Ilinea;
Ie = nexo1.Ie;
Ve1 = nexo1.Ve;
Vp1 = nexo1.Vp;
Vact_1 = nexo1.Vact;
Vo2_1 = nexo1.Vo2;
Vh2_1 = nexo1.Vh2;
SPact = nexo1.SPact;
SPo2 = nexo1.SPo2;
SPh2 = nexo1.SPh2;
E = nexo1.E;
E1 = nexo1.Eernst;

nexo1.Fh2o1 = F12h2o1; //-----
--Exportamos
nexo2.Fh2o1 = -F12h2o1;
nexo1.Fo2 = F12o2;
nexo2.Fo2 = -F12o2;
nexo1.Fh2 = F12h2;
nexo2.Fh2 = -F12h2;
nexo1.Fh2og = F12h2og;
nexo2.Fh2og = -F12h2og;
nexo1.Ilinea = Ilinea;
nexo2.Ie = -Ie;
nexo2.Ve = Ve2;
nexo2.Vp = Vp2;
nexo2.Vact = Vact_2;
nexo2.Vo2 = Vo2_2;
nexo2.Vh2 = Vh2_2;
nexo2.Eernst = E2;
nexo1.Fj = -G;
nexo2.Fj = -G;
nexo1.Fcond = Fcond;
nexo2.Fcond = -Fcond;
nexo1.Fc1 = Fconv1;
nexo2.Fc1 = -Fconv1;
nexo1.Fc2 = Fconv2;
nexo2.Fc2 = -Fconv2;

end TD_catalitica;

model VC_membrana

```

"Modela gases, líquidos y corrientes, contenidos en un pequeño volumen"

```
nexo nexol annotation (extent=[-30,-110; 30,-50]);
annotation (Coordsys(
  extent=[-100, -100; 100, 100],
  grid=[2, 2]),
  Icon(Rectangle(extent=[-60,58; 60,-42], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Rectangle(extent=[-2,-62; 2,-42], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
  Text(
    extent=[-100,60; 100,100],
    string="%name",
    style(
      color=58,
      rgbcolor={0,127,0},
      fillColor=30,
      rgbfillColor={215,215,215},
      fillPattern=1))),
  DymolaStoredErrors,
  Documentation(info="<html>
```

El volumen de control es la unidad mínima en la que dividimos el material.<br>

Tiene un único conector por el que entran o salen los gases al volumen.<br>

El flujo es positivo cuando el gas o la corriente entran en el volumen.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de evolución de las variables de estado:<br>

```
<pre>
```

$$\text{der}(\text{No2}) = \text{Fo2}$$

$$\text{der}(\text{Nh2og}) = \text{Fh2og} + \text{Gh2og}$$

$$\text{der}(\text{Nh2ol}) = \text{Fh2ol} + \text{Gh2ol}$$

$$\text{der}(T) = (\text{Fconv} + \text{Fcond} + \text{Gj} + \text{Gv}) / (\text{Cp} * \text{RHOs} * \text{Svc} * \text{Lvc})$$

```
</pre>
```

Ecuaciones de la temperatura:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Fconv} = \text{Fconv1} + \text{Fconv2}$$

```
</pre>
```

No se generan sobrepotenciales de activación ni subpresión:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Ie} = 0$$

$$\text{SPact} = 0$$

$$\text{SPo2} = 0$$

$$\text{E} = 0$$

</pre>

Ecuaciones referentes al agua líquida:<br>

<pre>

$$Nh_{2ol} = Mh_{2ol}/Mh_{2o}$$

$$Vh_{2ol} = Mh_{2ol}/RHO_{h_{2ol}}$$

$$Ch_{2ol} = Nh_{2ol}/V_{vc}$$

$$CHI = Mh_{2ol}/M_s$$

$$CHI_{max} = RHO_{h_{2ol}}*V_{poros}/M_s$$

$$CHI_{rel} = CHI/CHI_{max}$$

$$Nh_{2ol\_max} = RHO_{h_{2ol}}*V_{poros}/Mh_{2o}$$

$$Ch_{2ol\_max} = Nh_{2ol\_max}/V_{vc}$$

$$M_s = V_{vc}*RHO_s$$

$$Gh_{2ol} = V_g*ALFA_v*BETA*(Ph_{2og}-Psath_{2o})/(R*T)$$

$$Gh_{2og} = -Gh_{2ol}$$

$$Psath_{2o} = P0_{sath_{2o}}*Modelica.Math.exp((T-T0_{sat})*L_v/(R*T*T0_{sat}))$$

$$L_v = 3.1192e4+1.854018e2*T-8.05959e-1*T^2+1.379322e-3*T^3-9.9104399e-7*T^4$$

$$G_v = -L_v*Gh_{2og}$$

</pre>

Ecuaciones de estado de los gases en condiciones ideales:<br>

<pre>

$$Po_2*V_g = No_2*R*T$$

$$Ph_{2og}*V_g = Nh_{2og}*R*T$$

</pre>

Ecuaciones que caracterizan geoméricamente el material poroso:<br>

<pre>

$$V_{vc} = S_{vc}*L_{vc}$$

$$L_{vc} = L_{tot}/NUM_{vc}$$

$$EPSILON_{poros} = V_{poros}/V_{vc}$$

$$EPSILON_g = V_g/V_{vc}$$

$$V_{poros} = V_g+Vh_{2ol}$$

</pre>

Ecuaciones que importan desde el conector:<br>

<pre>

$$Fo_2 = nexo1.Fo_2$$

$$Fh_{2og} = nexo1.Fh_{2og}$$

$$Fh_{2ol} = nexo1.Fh_{2ol}$$

$$I_{linea} = nexo1.I_{linea}$$

$$V_{act} = nexo1.V_{act}$$

$$Vo_2 = nexo1.Vo_2$$

$$Ve = nexo1.Ve$$

$$V_p = nexo1.V_p$$

$$G_j = nexo1.F_j$$

$$F_{cond} = nexo1.F_{cond}$$

$$F_{conv1} = nexo1.F_{c1}$$

$$F_{conv2} = nexo1.F_{c2}$$

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia el conector:<br>

<pre>

$$nexo1.Po_2 = Po_2$$

$$nexo1.Ph_{2og} = Ph_{2og}$$

```
nexo1.Psath2o = Psath2o
nexo1.Ch2ol = Ch2ol
nexo1.T = T
nexo1.EPSILONg = EPSILONg
nexo1.SPact = SPact
nexo1.SPo2 = SPo2
nexo1.Ie = -Ie
nexo1.E = E
```

</pre>

</html>", revisions="<html> Con respecto a la ecuación de la presión de saturación del agua (Clasius-Clapeiron integrada):<br>

Psath2o = P0sath2o\*Modelica.Math.exp(((1/T0sat)-(1/T))\*Lv\*Mh2o/R)<br>

Tras una consulta con Alfonso Urquia 27/7/2011, eliminamos la masa molecular del agua Mh2o de la fórmula debido a que es dimensionalmente inconsistente, se trata de una errata.<br><br>

Se ha cambiado el valor de la superficie de condensación por el de ALFAv = 1e-2; debido a que se planteaba un valor demasiado elevado.<br><br>

La generación de agua líquida (Gh2ol) se hace proporcional a Vg y no a Vvc.<br><br>

La fórmula que daba la evolución de la entalpía de vaporización daba resultados irreales. La definitiva es  $Lv = 3.1192e4 + 1.854018e2 * T - 8.05959e-1 * T^2 + 1.379322e-3 * T^3 - 9.9104399e-7 * T^4$ .<br><br>

También se exporta el valor de EPSILONg para calcular la difusión de los gases en el modelo transporte\_x\_difusion.<br><br>

No se generan sobrepotenciales de activación ni subpresión de oxígeno.<br>

Se ha incorporado una sección initial equation para las condiciones iniciales de algunas variables.

En la versión (1.2), se incluyen las ecuaciones con la dinámica de la temperatura en función de los flujos conductivo y convectivo, además de la energía de vaporización del agua líquida. Por eso el parámetro temperatura ahora referencia a la temperatura inicial de la pila.

</html>"));

constant unidades2.constante\_gas\_ideal R = constantes.R;

```
parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;
parameter unidades.Density RHOH2ol=972;
parameter unidades.Density RHOs=2000;
parameter unidades.Temp_K T0=353;
parameter unidades.Temp_K T0sat=298.16;
parameter unidades2.porosidad EPSILONporos=0.4; //quizá menor?
parameter unidades.Length Ltot=8e-5;
parameter unidades.Area Svc=1;
parameter unidades2.superficie_condensacion ALFAv=1e-2;
parameter unidades2.transferencia_materia BETA=1e-3;
parameter unidades2.carga_agua CHIinicial=0.02;
parameter unidades2.moles No2inicial=0;
parameter unidades2.moles Nh2inicial=0;
parameter unidades2.moles Nh2oginicial=1e-6;
parameter unidades.Pressure P0sath2o=3169;
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=1047
```

"polímero plástico (teflon)";  
parameter Real NUMvc=20 "Número de volúmenes de control";

unidades2.Fneto Fo2;  
unidades2.Fneto Fh2;  
unidades2.Fneto Fh2og;  
unidades2.Fneto Fh2ol;  
unidades2.moles No2;  
unidades2.moles Nh2;  
unidades2.moles Nh2og;  
unidades2.moles Nh2ol;  
unidades2.moles Nh2ol\_max;  
unidades2.concentracion\_molar Ch2ol;  
unidades2.concentracion\_molar Ch2ol\_max;  
unidades2.generacion Gh2og;  
unidades2.generacion Gh2ol;  
unidades.EnergyFlowRate Gj;  
unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv2;  
unidades.EnergyFlowRate Gv;  
unidades.ElectricPotential Vact;  
unidades.ElectricPotential SPact;  
unidades.ElectricPotential Vo2;  
unidades.ElectricPotential Vh2;  
unidades.ElectricPotential SPo2;  
unidades.ElectricPotential SPh2;  
unidades.ElectricPotential Ve;  
unidades.ElectricPotential Vp;  
unidades.ElectricPotential E;  
unidades.ElectricPotential Enernst;  
unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
unidades2.entalpia\_molar Lv;  
unidades.Mass Mh2ol;  
unidades.Mass Ms;  
unidades.Volume Vh2ol;  
unidades.Volume Vg;  
unidades.Volume Vporos;  
unidades.Volume Vvc;  
unidades.Length Lvc;  
unidades2.porosidad EPSILONg;  
unidades2.carga\_agua CHI;  
unidades2.carga\_agua CHImax;  
unidades2.carga\_agua CHIrel;  
unidades.Pressure Po2;  
unidades.Pressure Ph2;  
unidades.Pressure Ph2og;  
unidades.Pressure Psath2o;  
unidades.Temp\_K T;

unidades.ElectricCurrent Ie;

equation

der(No2) = Fo2; //-----Evolución de  
las variables de estado de los gases

der(Nh2og) = Fh2og+Gh2og;

der(Nh2ol) = Fh2ol+Gh2ol;

der(Nh2) = Fh2;

der(T) = (Fconv+Fcond+Gj+Gv)/(Cp\*RHOs\*Svc\*Lvc); //-----  
Evolución de la temperatura

Fconv = Fconv1+Fconv2;

Ie = 0; //-----En esta capa no se  
generan sobrepotenciales de activación ni de subpresión de oxígeno.

SPact = 0;

SPo2 = 0;

SPh2 = 0;

E = 0;

Nh2ol = Mh2ol/Mh2o; //-----Agua líquida

Vh2ol = Mh2ol/RHOh2ol;

Ch2ol = Nh2ol/Vvc;

CHI = Mh2ol/Ms;

CHImax = RHOh2ol\*Vporos/Ms;

CHIrel = CHI/CHImax;

Nh2ol\_max = RHOh2ol\*Vporos/Mh2o;

Ch2ol\_max = Nh2ol\_max/Vvc;

Ms = Vvc\*RHOs;

Gh2ol = Vg\*ALFAv\*BETA\*(Ph2og-Psath2o)/(R\*T);

Gh2og = -Gh2ol;

Psath2o = P0sath2o\*Modelica.Math.exp((T-T0sat)\*Lv/(R\*T\*T0sat));

Lv = 3.1192e4+1.854018e2\*T-8.05959e-1\*T^2+1.379322e-3\*T^3-9.9104399e-  
7\*T^4;

Gv = -Lv\*Gh2og;

Po2\*Vg = No2\*R\*T; //-----Ecuaciones  
de estado de los gases

Ph2og\*Vg = Nh2og\*R\*T;

Ph2\*Vg = Nh2\*R\*T;

Vvc = Svc\*Lvc; //-----

Caracterización geométrica del material

Lvc = Ltot/NUMvc;

EPSILONporos = Vporos/Vvc;

EPSILONg = Vg/Vvc;

Vporos = Vg+Vh2ol;

```

Fo2 = nexo1.Fo2; //-----Importamos
desde el conector
Fh2 = nexo1.Fh2;
Fh2og = nexo1.Fh2og;
Fh2ol = nexo1.Fh2ol;
Ilinea = nexo1.Ilinea;
Vact = nexo1.Vact;
Vo2 = nexo1.Vo2;
Vh2 = nexo1.Vh2;
Ve = nexo1.Ve;
Vp = nexo1.Vp;
Gj = nexo1.Fj;
Fcond = nexo1.Fcond;
Fconv1 = nexo1.Fc1;
Fconv2 = nexo1.Fc2;
nexo1.Eernst = Eernst;

nexo1.Po2 = Po2; //-----Exportamos al
conector
nexo1.Ph2 = Ph2;
nexo1.Ph2og = Ph2og;
nexo1.Psath2o = Psath2o;
nexo1.Ch2ol = Ch2ol;
nexo1.T = T;
nexo1.EPSILONg = EPSILONg;
nexo1.SPact = SPact;
nexo1.SPo2 = SPo2;
nexo1.SPh2 = SPh2;
nexo1.Ie = -Ie;
nexo1.E = E;

initial equation

CHI = CHIinicial;
No2 = No2inicial;
Nh2 = Nh2inicial;
Nh2og = Nh2oginicial;
T = T0;

end VC_membrana;

model TD_membrana
"Transporte por difusion de dos gases, un liquido y corrientes, en un medio poroso."

nexo nexo1 "A"
    annotation (extent=[-100,-20; -60,20]);
nexo nexo2 "B"
    annotation (extent=[60,-20; 100,20]);
annotation (Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],

```

```

    grid=[2, 2]),
Icon(Polygon(points=[-66,0; -40,40; -40,20; 40,20; 40,40; 66,0; 40,
    -40; 40,-20; -40,-20; -40,-40; -66,0],
style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
Text(
    extent=[-80,-80; 80,-60],
    style(
        color=58,
        rgbcolor={0,127,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215},
        fillPattern=1),
    string="%name"),
Text(
    extent=[-90,30; -70,50],
    string="A",
    style(
        color=42,
        rgbcolor={127,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1)),
Text(
    extent=[70,30; 90,50],
    style(
        color=42,
        rgbcolor={127,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1),
    string="B"),
Text(
    extent=[-22,-10; -2,10],
    style(
        color=42,
        rgbcolor={127,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1),
    string="+"),
Line(points=[-2,0; 18,0; 12,4; 12,-4; 18,0], style(
    color=42,
    rgbcolor={127,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170},
    fillPattern=1))),

```

Diagram,  
DymolaStoredErrors,  
Documentation(info="<html>

El fenómeno de transporte describe la difusión de un gas, un líquido y las corrientes  
protónicas a través de un material poroso.<br>

Tiene dos conectores que representan las superficies de los volúmenes de control  
(superficies de control).<br>

El flujo es positivo cuando las especies cruzan desde A hacia B.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de caracterización geométrica del material:<br>

<pre>

$$L_{vc} = L_{tot}/NUM_{vc}$$

$$EPSILON_g = \sqrt{(Eg1^2 + Eg2^2)/2}$$

</pre>

Ecuaciones referentes a la difusión del agua líquida:<br>

<pre>

$$F_{12h2o_l} = S_{vc} * Dh_{2o_l} * (C_1 - C_2) / L_{vc}$$

$$F_{12e_o} = 5 * I_p / F$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del oxígeno:<br>

<pre>

$$P_{o_2} = 0$$

$$F_{12o_2} = 0$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del vapor de agua:<br>

<pre>

$$Ph_{2og} = \sqrt{(Ph_{2ogvc1}^2 + Ph_{2ogvc2}^2)/2}$$

$$Ps_{ath2o} = \sqrt{(Ps_{ath2ovc1}^2 + Ps_{ath2ovc2}^2)/2};$$

$$J_{h2og} = (Ph_{2ogvc1} - Ph_{2ogvc2}) * EPSILON_g * Dh_{2ogk} / (L_{vc} * (TAU^2) * R * T_g)$$

$$F_{12h2og} = J_{h2og} * S_{vc}$$

$$T_g = (T_1 + T_2) / 2$$

</pre>

Ecuaciones de cálculo e integración de los sobrepotenciales ohmicos:<br>

<pre>

$$SP_e = 0$$

$$V_{e2} = 0$$

$$I_p = I_{linea} - I_e$$

$$ALFA = Ph_{2og} / Ps_{ath2o}$$

$$LAMBDA_m = 0.043 + 17.81 * ALFA - 39.85 * (ALFA)^2 + 36 * (ALFA)^3$$

$$b_1 = b_{11} * LAMBDA_m - b_{12}$$

$$K_p = b_1 * Modelica.Math.exp(b_2 * ((T_g - t_2) / (T_g * t_2)))$$

$$SP_p = (I_p * L_{vc}) / (S_{vc} * K_p * EPSILON_e)$$

$$V_{p2} = V_{p1} + SP_p$$

</pre>

Ecuaciones de integración de los sobrepotenciales de activación y subpresión de  
oxígeno:<br>

<pre>

$$V_{act\_2} = V_{act\_1} + SP_{act}$$

$$V_{o_2\_2} = V_{o_2\_1} + SP_{o_2}$$

</pre>

Integración del potencial de Nernst:<br>

```
<pre>
E2 = E1+E
```

```
</pre>
```

Ecuaciones del efecto Joule:<br>

```
<pre>
Gp = Ip*SPp
G = (Gp+Ge)/2
```

```
</pre>
```

Ecuaciones de conducción y convección térmicas:<br>

```
<pre>
Fcond = SIGMAAt*Svc*(T1-T2)/Lvc
Fconv1 = if noEvent(F12h2ol>=0) then Cp*F12h2ol*Mh2o*(T1-T2) else
Cp*F12h2ol*Mh2o*(T2-T1)
Fconv2 = if noEvent(F12h2og>=0) then Cpv*F12h2og*Mh2o*(T1-T2) else
Cpv*F12h2og*Mh2o*(T2-T1)
```

```
</pre>
```

Ecuaciones que importan desde los conectores:<br>

```
<pre>
C1 = nexo1.Ch2ol
C2 = nexo2.Ch2ol
Po2vc1 = nexo1.Po2
Po2vc2 = nexo2.Po2
Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og
Psath2ovc1 = nexo1.Psath2o
Psath2ovc2 = nexo2.Psath2o
T1 = nexo1.T
T2 = nexo2.T
Eg1 = nexo1.EPSILONg
Eg2 = nexo2.EPSILONg
Ilinea = nexo2.Ilinea
Ie = nexo1.Ie
Ve1 = nexo1.Ve
Vp1 = nexo1.Vp
Vact_1 = nexo1.Vact
Vo2_1 = nexo1.Vo2
SPact = nexo1.SPact
SPo2 = nexo1.SPo2
E = nexo1.E
E1 = nexo1.Eernst
```

```
</pre>
```

Ecuaciones que exportan hacia los conectores:<br>

```
<pre>
nexo1.Fh2ol = F12h2ol
nexo2.Fh2ol = -F12h2ol
nexo1.Fo2 = F12o2
nexo2.Fo2 = -F12o2
nexo1.Fh2og = F12h2og
nexo2.Fh2og = -F12h2og
```

```

nexo1.Ilinea = Ilinea
nexo2.Ie = -Ie
nexo2.Ve = Ve2
nexo2.Vp = Vp2
nexo2.Vact = Vact_2
nexo2.Vo2 = Vo2_2
nexo2.Enernst = E2
nexo1.Fj = -G
nexo2.Fj = -G
nexo1.Fcond = Fcond
nexo2.Fcond = -Fcond
nexo1.Fc1 = Fconv1
nexo2.Fc1 = -Fconv1
nexo1.Fc2 = Fconv2
nexo2.Fc2 = -Fconv2

```

</pre>

Además de los siguientes parámetros:

</html>", revisions="<html>En lo referente a la porosidad del material, en este texto la denominación EPSILONporos.<br>

En el guión de prácticas se denomina también EPSILONs.<br>

Los valores para los parámetros que faltaban en el guión son los siguientes:<br>

<pre>

```

Dh2ol = 3.5e-11(m2/s)<br>
Do2h2og_ref = 2.82e-3(m2/s)<br>
Pg_ref = 1e5(Pa)<br>
Tg_ref = 308.1(°K)<br>

```

</pre><br>

Incorpora la importación de EPSILONg para calcular la difusión de los gases.<br>

Se ha cambiado la expresión de la presión de los gases desde una fórmula basada en eventos, a otra basada en la media cuadrática.

Eso incrementará el rendimiento.<br>

Se han incorporado los cálculos de sobrepotencial ohmico protónico, el cual es el único presente en esta capa.

En la versión 1.2, se incluyen las ecuaciones de conducción y convección térmicas.

También se ha intentado disminuir el número de descripciones basadas en eventos.

Se incluyen nuevos fenómenos tales como el fenómeno de arrastre electroosmótico, la variación del potencial en función de la temperatura o la variación de la conductividad protónica en función de la humedad del Nafion.

</html>"));

```

constant unidades2.constante_gas_ideal R = constantes.R;
constant unidades.FaradayConstant F=96485;

```

```

parameter unidades.Area Svc=1;
parameter unidades.Length Ltot=8e-5;
parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;
parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ol=5.5e-6;
parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ogk=1e-6;
parameter unidades2.porosidad EPSILONs=0.6; //revisar con VC!
parameter unidades2.porosidad EPSILONe=0.72;

```

parameter unidades2.tortuosidad TAU=1;  
parameter unidades.ThermalConductivity SIGMA<sub>t</sub>=0.0586;  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=4181 "agua líquida";  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cpv=2080 "agua vapor";  
parameter unidades.Conductivity b11=0.5139;  
parameter unidades.Conductivity b12=0.3260;  
parameter unidades.Temp\_K b2=1268;  
parameter unidades.Temp\_K t2=303;  
parameter unidades2.solvatacion S=5;  
parameter Real NUMvc=20 "Numero de volúmenes de control";

unidades2.concentracion\_molar C1;  
unidades2.concentracion\_molar C2;  
unidades2.Fneto F12h2ol;  
unidades2.Fneto F12o2;  
unidades2.Fneto F12h2;  
unidades2.Fneto F12h2og;  
unidades2.Fneto F12eo;  
unidades2.Cneta Jh2og;  
unidades.Pressure Po2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Po2vc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Po2vc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2vc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2vc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2og( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2ogvc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Ph2ogvc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Psath2o( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Psath2ovc1( displayUnit="Pa");  
unidades.Pressure Psath2ovc2( displayUnit="Pa");  
unidades.Temperature Tg;  
unidades.Temperature T1;  
unidades.Temperature T2;  
unidades.Length Lvc;  
unidades2.porosidad Eg1;  
unidades2.porosidad Eg2;  
unidades2.porosidad EPSILONg;  
unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
unidades.ElectricCurrent Ip;  
unidades.ElectricPotential SPe;  
unidades.ElectricPotential Ve1;  
unidades.ElectricPotential Ve2;  
unidades.ElectricPotential Vp1;  
unidades.ElectricPotential Vp2;  
unidades.ElectricPotential SPp;  
unidades.ElectricPotential SPact;  
unidades.ElectricPotential SPO2;  
unidades.ElectricPotential SPh2;  
unidades.ElectricPotential Vo2\_1;

unidades.ElectricPotential Vo2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_2;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential E1;  
 unidades.ElectricPotential E2;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;  
 unidades.Conductivity Kp;  
 unidades.Conductivity b1;  
 unidades2.hidratacion LAMBDAm;  
 unidades2.humedad\_relativa ALFA;  
 unidades.EnergyFlowRate Gp;  
 unidades.EnergyFlowRate G;  
 unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv2;

equation

Lvc = Ltot/NUMvc; //-----

-----Caracterización geométrica del material

EPSILONg = sqrt((Eg1^2+Eg2^2)/2);

F12h2ol = (Svc\*Dh2ol\*(C1-C2)/Lvc)+F12eo; //-----

-----Difusión del agua líquida

F12eo = S\*Ip/F;

Po2 = 0; //-----

--El oxígeno no se difunde.

F12o2 = 0;

F12h2 = 0;

Ph2 = 0;

Ph2og = sqrt((Ph2ogvc1^2+Ph2ogvc2^2)/2); //-----

-----Difusión del vapor de agua

Psath2o = sqrt((Psath2ovc1^2+Psath2ovc2^2)/2);

Jh2og = (Ph2ogvc1-Ph2ogvc2)\*EPSILONg\*Dh2ogk/(Lvc\*(TAU^2)\*R\*Tg);

F12h2og = Jh2og\*Svc;

Tg = (T1+T2)/2;

SPE = 0; //-----

--Cálculo de los sobrepotenciales ohmicos

Ve2 = 0;

Ip = Ilinea-Ie;

ALFA = Ph2og/Psath2o;

LAMBDAm = 0.043+17.81\*ALFA-39.85\*(ALFA)^2+36\*(ALFA)^3;

b1 = b11\*LAMBDAm-b12;

Kp = b1\*Modelica.Math.exp(b2\*((Tg-t2)/(Tg\*t2)));

```

Spp = (Ip*Lvc)/(Svc*Kp*EPSILONe);
Vp2 = Vp1 + Spp;

Vact_2 = Vact_1+SPact; //-----
-----Integración de los sobrepotenciales de activación y depresión.
Vo2_2 = Vo2_1+SPo2;
Vh2_2 = Vh2_1+SPh2;

E2 = E1+E; //-----
----Integración del potencial de Nernst

Gp = Ip*Spp; //-----
-----Efecto Joule
G = Gp/2;

Fcond = SIGMAAt*Svc*(T1-T2)/Lvc; //-----
-----Conducción térmica

Fconv1 = if noEvent(F12h2ol>=0) then Cp*F12h2ol*Mh2o*(T1-T2) else
Cp*F12h2ol*Mh2o*(T2-T1); //-----Convección
Fconv2 = if noEvent(F12h2og>=0) then Cpv*F12h2og*Mh2o*(T1-T2) else
Cpv*F12h2og*Mh2o*(T2-T1);

C1 = nexo1.Ch2ol; //-----
-----Importamos
C2 = nexo2.Ch2ol;
Po2vc1 = nexo1.Po2;
Po2vc2 = nexo2.Po2;
Ph2vc1 = nexo1.Ph2;
Ph2vc2 = nexo2.Ph2;
Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og;
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og;
Psath2ovc1 = nexo1.Psath2o;
Psath2ovc2 = nexo2.Psath2o;
T1 = nexo1.T;
T2 = nexo2.T;
Eg1 = nexo1.EPSILONg;
Eg2 = nexo2.EPSILONg;
Ilinea = nexo2.Ilinea;
Ie = nexo1.Ie;
Ve1 = nexo1.Ve;
Vp1 = nexo1.Vp;
Vact_1 = nexo1.Vact;
Vo2_1 = nexo1.Vo2;
Vh2_1 = nexo1.Vh2;
SPact = nexo1.SPact;
SPo2 = nexo1.SPo2;
SPh2 = nexo1.SPh2;
E = nexo1.E;
E1 = nexo1.Eernst;

```

```

nexo1.Fh2ol = F12h2ol; //-----
-----Exportamos
nexo2.Fh2ol = -F12h2ol;
nexo1.Fo2 = F12o2;
nexo2.Fo2 = -F12o2;
nexo2.Fh2 = -F12h2;
nexo1.Fh2 = F12h2;
nexo1.Fh2og = F12h2og;
nexo2.Fh2og = -F12h2og;
nexo1.Ilinea = Ilinea;
nexo2.Ie = -Ie;
nexo2.Ve = Ve2;
nexo2.Vp = Vp2;
nexo2.Vact = Vact_2;
nexo2.Vo2 = Vo2_2;
nexo2.Vh2 = Vh2_2;
nexo2.Enernst = E2;
nexo1.Fj = -G;
nexo2.Fj = -G;
nexo1.Fcond = Fcond;
nexo2.Fcond = -Fcond;
nexo1.Fc1 = Fconv1;
nexo2.Fc1 = -Fconv1;
nexo1.Fc2 = Fconv2;
nexo2.Fc2 = -Fconv2;

```

```
end TD_membrana;
```

```
model VC_difusora
```

```
"Modela gases, liquidos y corrientes, contenidos en un pequeño volumen"
```

```

nexo nexo1 annotation (extent=[-30,-110; 30,-50]);
annotation (Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],
    grid=[2, 2]),
    Icon(Rectangle(extent=[-60,58; 60,-42], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1)),
    Rectangle(extent=[-2,-62; 2,-42], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Text(
        extent=[-100,60; 100,100],

```

```

string="%name",
style(
  color=58,
  rgbcolor={0,127,0},
  fillColor=30,
  rgbfillColor={215,215,215},
  fillPattern=1))),
DymolaStoredErrors,
Documentation(info="<html>

```

El volumen de control es la unidad mínima en la que dividimos el material.<br>

Tiene un único conector por el que entran o salen los gases al volumen.<br>

El flujo es positivo cuando el gas o la corriente entran en el volumen.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de evolución de las variables de estado:<br>

```
<pre>
```

$$\text{der}(\text{No2}) = \text{Fo2}$$

$$\text{der}(\text{Nh2og}) = \text{Fh2og} + \text{Gh2og}$$

$$\text{der}(\text{Nh2ol}) = \text{Fh2ol} + \text{Gh2ol}$$

$$\text{der}(T) = (\text{Fconv} + \text{Fcond} + \text{Gj} + \text{Gv}) / (\text{Cp} * \text{RHOs} * \text{Svc} * \text{Lvc})$$

```
</pre>
```

Ecuaciones de la temperatura:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Fconv} = \text{Fconv1} + \text{Fconv2}$$

```
</pre>
```

No se generan sobrepotenciales de activación ni subpresión:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Ie} = 0$$

$$\text{SPact} = 0$$

$$\text{SPo2} = 0$$

$$\text{E} = 0$$

```
</pre>
```

Ecuaciones referentes al agua líquida:<br>

```
<pre>
```

$$\text{Nh2ol} = \text{Mh2ol} / \text{Mh2o}$$

$$\text{Vh2ol} = \text{Mh2ol} / \text{RHOh2ol}$$

$$\text{Ch2ol} = \text{Nh2ol} / \text{Vvc}$$

$$\text{CHI} = \text{Mh2ol} / \text{Ms}$$

$$\text{CHI}_{\text{max}} = \text{RHOh2ol} * \text{Vporos} / \text{Ms}$$

$$\text{CHI}_{\text{rel}} = \text{CHI} / \text{CHI}_{\text{max}}$$

$$\text{Nh2ol}_{\text{max}} = \text{RHOh2ol} * \text{Vporos} / \text{Mh2o}$$

$$\text{Ch2ol}_{\text{max}} = \text{Nh2ol}_{\text{max}} / \text{Vvc}$$

$$\text{Ms} = \text{Vvc} * \text{RHOs}$$

$$\text{Gh2ol} = \text{Vg} * \text{ALFAv} * \text{BETA} * (\text{Ph2og} - \text{Psath2o}) / (\text{R} * \text{T})$$

$$\text{Gh2og} = -\text{Gh2ol}$$

$$\text{Psath2o} = \text{P0sath2o} * \text{Modelica.Math.exp}((\text{T} - \text{T0sat}) * \text{Lv} / (\text{R} * \text{T} * \text{T0sat}))$$

$$\text{Lv} = 3.1192\text{e}4 + 1.854018\text{e}2 * \text{T} - 8.05959\text{e}-1 * \text{T}^2 + 1.379322\text{e}-3 * \text{T}^3 - 9.9104399\text{e}-7 * \text{T}^4$$

$$\text{Gv} = -\text{Lv} * \text{Gh2og}$$

```
</pre>
```

Ecuaciones de estado de los gases en condiciones ideales:<br>

```
<pre>
```

$$Po2*Vg = No2*R*T$$
$$Ph2og*Vg = Nh2og*R*T$$

</pre>

Ecuaciones que caracterizan geométricamente el material poroso:<br>

<pre>

$$Vvc = Svc*Lvc$$
$$Lvc = Ltot/NUMvc$$
$$EPSILONporos = Vporos/Vvc$$
$$EPSILONg = Vg/Vvc$$
$$Vporos = Vg+Vh2ol$$

</pre>

Ecuaciones que importan desde el conector:<br>

<pre>

$$Fo2 = nexo1.Fo2$$
$$Fh2og = nexo1.Fh2og$$
$$Fh2ol = nexo1.Fh2ol$$
$$Ilinea = nexo1.Ilinea$$
$$Vact = nexo1.Vact$$
$$Vo2 = nexo1.Vo2$$
$$Ve = nexo1.Ve$$
$$Vp = nexo1.Vp$$
$$Gj = nexo1.Fj$$
$$Fcond = nexo1.Fcond$$
$$Fconv1 = nexo1.Fc1$$
$$Fconv2 = nexo1.Fc2$$

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia el conector:<br>

<pre>

$$nexo1.Po2 = Po2$$
$$nexo1.Ph2og = Ph2og$$
$$nexo1.Psath2o = Psath2o$$
$$nexo1.Ch2ol = Ch2ol$$
$$nexo1.T = T$$
$$nexo1.EPSILONg = EPSILONg$$
$$nexo1.SPact = SPact$$
$$nexo1.SPo2 = SPo2$$
$$nexo1.Ie = -Ie$$
$$nexo1.E = E$$

</pre>

</html>", revisions="<html> Con respecto a la ecuación de la presión de saturación del agua (Clasius-Clapeiron integrada):<br>

$$Psath2o = P0sath2o*Modelica.Math.exp(((1/T0sat)-(1/T))*Lv*Mh2o/R)<br>$$

Tras una consulta con Alfonso Urquia 27/7/2011, eliminamos la masa molecular del agua Mh2o de la fórmula debido a que es dimensionalmente inconsistente, se trata de una errata.<br><br>

Se ha cambiado el valor de la superficie de condensación por el de ALFAv = 1e-2; debido a que se planteaba un valor demasiado elevado.<br><br>

La generación de agua líquida (Gh2ol) se hace proporcional a Vg y no a Vvc.<br><br>

La fórmula que daba la evolución de la entalpía de vaporización daba resultados irreales. La definitiva es  $L_v = 3.1192e4 + 1.854018e2 * T - 8.05959e-1 * T^2 + 1.379322e-3 * T^3 - 9.9104399e-7 * T^4$ .

También se exporta el valor de EPSILONg para calcular la difusión de los gases en el modelo transporte\_x\_difusion.

No se generan sobrepotenciales de activación ni subpresión.

También se ha incluido una sección inicial equation para iniciar las variables del modelo.

En la versión (1.2), se incluyen las ecuaciones con la dinámica de la temperatura en función de los flujos conductivo y convectivo, además de la energía de vaporización del agua líquida. Por eso el parámetro temperatura ahora referencia a la temperatura inicial de la pila.

```
constant unidades2.constante_gas_ideal R = constantes.R;
```

```
parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;  
parameter unidades.Density RHOh2ol=972;  
parameter unidades.Density RHOs=4000;  
parameter unidades.Temp_K T0=353;  
parameter unidades.Temp_K T0sat=298.16;  
parameter unidades2.porosidad EPSILONporos=0.6;  
parameter unidades.Length Ltot=1.6e-3;  
parameter unidades.Area Svc=1;  
parameter unidades2.superficie_condensacion ALFAv=1e-2;  
parameter unidades2.transferencia_materia BETA=1e-3;  
parameter unidades2.carga_agua CHIinicial=0.01;  
parameter unidades2.moles No2inicial=1e-3;  
parameter unidades2.moles Nh2inicial=0;  
parameter unidades2.moles Nh2oginicial=1e-5;  
parameter unidades.Pressure P0sath2o=3169;  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=711 "grafito";  
parameter Real NUMvc=20 "Número de volúmenes de control";
```

```
unidades2.Fneto Fo2;  
unidades2.Fneto Fh2;  
unidades2.Fneto Fh2og;  
unidades2.Fneto Fh2ol;  
unidades2.moles No2;  
unidades2.moles Nh2;  
unidades2.moles Nh2og;  
unidades2.moles Nh2ol;  
unidades2.moles Nh2ol_max;  
unidades2.concentracion_molar Ch2ol;  
unidades2.concentracion_molar Ch2ol_max;  
unidades2.generacion Gh2og;  
unidades2.generacion Gh2ol;  
unidades.EnergyFlowRate Gj;  
unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv;
```

unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv2;  
 unidades.EnergyFlowRate Gv;  
 unidades.ElectricPotential Vact;  
 unidades.ElectricPotential SPact;  
 unidades.ElectricPotential Vo2;  
 unidades.ElectricPotential Vh2;  
 unidades.ElectricPotential SPo2;  
 unidades.ElectricPotential SPh2;  
 unidades.ElectricPotential Ve;  
 unidades.ElectricPotential Vp;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential Eernst;  
 unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
 unidades2.entalpia\_molar Lv;  
 unidades.Mass Mh2ol;  
 unidades.Mass Ms;  
 unidades.Volume Vh2ol;  
 unidades.Volume Vg;  
 unidades.Volume Vporos;  
 unidades.Volume Vvc;  
 unidades.Length Lvc;  
 unidades2.porosidad EPSILONg;  
 unidades2.carga\_agua CHI;  
 unidades2.carga\_agua CHImax;  
 unidades2.carga\_agua CHIrel;  
 unidades.Pressure Po2;  
 unidades.Pressure Ph2;  
 unidades.Pressure Ph2og;  
 unidades.Pressure Psath2o;  
 unidades.Temp\_K T;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;

equation

der(No2) = Fo2; //-----

Evolución de las variables de estado de los gases

der(Nh2og) = Fh2og+Gh2og;

der(Nh2ol) = Fh2ol+Gh2ol;

der(Nh2) = Fh2;

der(T) = (Fconv+Fcond+Gj+Gv)/(Cp\*RHOs\*Svc\*Lvc); //-----

-----Evolución de la temperatura

Fconv = Fconv1+Fconv1;

Ie = 0; //-----En esta

capa no se generan corrientes ni sobrepotenciales de activación o subpresión

SPact = 0;

SPo2 = 0;

SPh2 = 0;

$$E = 0;$$

$$\text{Nh2ol} = \text{Mh2ol}/\text{Mh2o}; //-----$$

Agua líquida

$$\text{Vh2ol} = \text{Mh2ol}/\text{RHOh2ol};$$

$$\text{Ch2ol} = \text{Nh2ol}/\text{Vvc};$$

$$\text{CHI} = \text{Mh2ol}/\text{Ms};$$

$$\text{CHI}_{\text{max}} = \text{RHOh2ol} * \text{Vporos}/\text{Ms};$$

$$\text{CHI}_{\text{rel}} = \text{CHI}/\text{CHI}_{\text{max}};$$

$$\text{Nh2ol}_{\text{max}} = \text{RHOh2ol} * \text{Vporos}/\text{Mh2o};$$

$$\text{Ch2ol}_{\text{max}} = \text{Nh2ol}_{\text{max}}/\text{Vvc};$$

$$\text{Ms} = \text{Vvc} * \text{RHO};$$

$$\text{Gh2ol} = \text{Vg} * \text{ALFAv} * \text{BETA} * (\text{Ph2og} - \text{Psath2o})/(\text{R} * \text{T});$$

$$\text{Gh2og} = -\text{Gh2ol};$$

$$\text{Psath2o} = \text{P0sath2o} * \text{Modelica.Math.exp}((\text{T} - \text{T0sat}) * \text{Lv}/(\text{R} * \text{T} * \text{T0sat}));$$

$$\text{Lv} = 3.1192\text{e}4 + 1.854018\text{e}2 * \text{T} - 8.05959\text{e}-1 * \text{T}^2 + 1.379322\text{e}-3 * \text{T}^3 - 9.9104399\text{e}-7 * \text{T}^4;$$

$$\text{Gv} = -\text{Lv} * \text{Gh2og};$$

$$\text{Po2} * \text{Vg} = \text{No2} * \text{R} * \text{T}; //-----$$

Ecuaciones de estado de los gases

$$\text{Ph2og} * \text{Vg} = \text{Nh2og} * \text{R} * \text{T};$$

$$\text{Ph2} * \text{Vg} = \text{Nh2} * \text{R} * \text{T};$$

$$\text{Vvc} = \text{Svc} * \text{Lvc}; //-----$$

Caracterización geométrica del material

$$\text{Lvc} = \text{Ltot}/\text{NUMvc};$$

$$\text{EPSILONporos} = \text{Vporos}/\text{Vvc};$$

$$\text{EPSILONg} = \text{Vg}/\text{Vvc};$$

$$\text{Vporos} = \text{Vg} + \text{Vh2ol};$$

$$\text{Fo2} = \text{nexo1.Fo2}; //-----$$

Importamos desde el conector

$$\text{Fh2} = \text{nexo1.Fh2};$$

$$\text{Fh2og} = \text{nexo1.Fh2og};$$

$$\text{Fh2ol} = \text{nexo1.Fh2ol};$$

$$\text{llinea} = \text{nexo1.llinea};$$

$$\text{Vact} = \text{nexo1.Vact};$$

$$\text{Vo2} = \text{nexo1.Vo2};$$

$$\text{Vh2} = \text{nexo1.Vh2};$$

$$\text{Ve} = \text{nexo1.Ve};$$

$$\text{Vp} = \text{nexo1.Vp};$$

$$\text{Gj} = \text{nexo1.Fj};$$

$$\text{Fcond} = \text{nexo1.Fcond};$$

$$\text{Fconv1} = \text{nexo1.Fc1};$$

$$\text{Fconv2} = \text{nexo1.Fc2};$$

$$\text{nexo1.Enernst} = \text{Enernst};$$

$$\text{nexo1.Po2} = \text{Po2}; //-----$$

Exportamos al conector

```

nexo1.Ph2 = Ph2;
nexo1.Ph2og = Ph2og;
nexo1.Psath2o = Psath2o;
nexo1.Ch2ol = Ch2ol;
nexo1.T = T;
nexo1.EPSILONg = EPSILONg;
nexo1.SPact = SPact;
nexo1.SPo2 = SPo2;
nexo1.SPh2 = SPh2;
nexo1.Ie = -Ie;
nexo1.E = E;

```

initial equation

```

CHI = CHIinicial;
No2 = No2inicial;
Nh2 = Nh2inicial;
Nh2og = Nh2oginicial;
T = T0;

```

end VC\_difusora;

model TD\_difusora

"Transporte por difusion de dos gases, un liquido y corrientes, en un medio poroso."

```

nexo nexo1 "A"
    annotation (extent=[-100,-20; -60,20]);
nexo nexo2 "B"
    annotation (extent=[60,-20; 100,20]);
annotation (Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],
    grid=[2, 2]),
    Icon(Polygon(points=[-66,0; -40,40; -40,20; 40,20; 40,40; 66,0; 40,
        -40; 40,-20; -40,-20; -40,-40; -66,0],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170})),
    Text(
        extent=[-80,-80; 80,-60],
        style(
            color=58,
            rgbcolor={0,127,0},
            fillColor=30,
            rgbfillColor={215,215,215},
            fillPattern=1),
        string="%name"),
    Text(
        extent=[-90,30; -70,50],

```

```

    string="A",
    style(
      color=42,
      rgbcolor={127,0,0},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170},
      fillPattern=1)),
  Text(
    extent=[70,30; 90,50],
    style(
      color=42,
      rgbcolor={127,0,0},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170},
      fillPattern=1),
    string="B"),
  Text(
    extent=[-22,-10; -2,10],
    style(
      color=42,
      rgbcolor={127,0,0},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170},
      fillPattern=1),
    string="+"),
  Line(points=[-2,0; 18,0; 12,4; 12,-4; 18,0], style(
    color=42,
    rgbcolor={127,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170},
    fillPattern=1))),
  Diagram,
  DymolaStoredErrors,
  Documentation(info="<html>

```

El fenómeno de transporte describe la difusión de dos gases, un líquido y la corriente electrónica, a través de un material poroso.<br>

Tiene dos conectores que representan las superficies de los volúmenes de control (superficies de control).<br>

El flujo es positivo cuando las especies cruzan desde A hacia B.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de caracterización geométrica del material:<br>

<pre>

$$L_{vc} = L_{tot}/NUM_{vc}$$

$$EPSILON_g = \sqrt{((Eg1^2 + Eg2^2)/2)}$$

</pre>

Ecuaciones referentes a la difusión binaria:<br>

<pre>

$$P_g = P_{o2} + P_{h2o}$$

$$T_g = (T1 + T2)/2$$

$$Do_{h2o} = Do_{h2o\_ref} * (P_g/P_{g\_ref}) * ((T_g/T_{g\_ref})^{1.5})$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del agua líquida:<br>

<pre>

$$F_{12H_2O_l} = S_{vc} * D_{h2ol} * (C_1 - C_2) / L_{vc}$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del oxígeno:<br>

<pre>

$$P_{o2} = \sqrt{(P_{o2vc1}^2 + P_{o2vc2}^2) / 2}$$

$$(P_{o2vc1} - P_{o2vc2}) / L_{vc} = R * T_g * (TAU^2) * ((1 / D_{o2k}) + (1 / D_{o2h2og})) * J_{o2} / EPSILON_g$$

$$F_{12o2} = J_{o2} * S_{vc}$$

</pre>

Ecuaciones de difusión del vapor de agua:<br>

<pre>

$$P_{h2og} = \sqrt{(P_{h2ogvc1}^2 + P_{h2ogvc2}^2) / 2}$$

$$J_{h2og} = (P_{h2ogvc1} -$$

$$P_{h2ogvc2}) * EPSILON_g * D_{h2ogk} * D_{o2h2og} / (L_{vc} * (TAU^2) * R * T_g * (D_{o2h2og} + D_{h2ogk}))$$

$$F_{12h2og} = J_{h2og} * S_{vc}$$

</pre>

Ecuaciones de cálculo e integración de los sobrepotenciales ohmicos:<br>

<pre>

$$S_{Pe} = (I_e * L_{vc}) / (S_{vc} * SIGMA_e * EPSILON_s)$$

$$V_{e2} = V_{e1} + S_{Pe}$$

$$I_p = I_{linea} - I_e$$

$$S_{Pp} = 0$$

$$V_{p2} = V_{p1} + S_{Pp}$$

</pre>

Ecuaciones de integración de los sobrepotenciales de activación y subpresión de oxígeno:<br>

<pre>

$$V_{act\_2} = V_{act\_1} + S_{Pact}$$

$$V_{o2\_2} = V_{o2\_1} + S_{Po2}$$

</pre>

Integración del potencial de Nernst:<br>

<pre>

$$E_2 = E_1 + E$$

</pre>

Ecuaciones del efecto Joule:<br>

<pre>

$$G_e = I_e * S_{Pe}$$

$$G = G_e / 2$$

</pre>

Ecuaciones de conducción y convección térmicas:<br>

<pre>

$$F_{cond} = SIGMA_{At} * S_{vc} * (T_1 - T_2) / L_{vc}$$

$$F_{conv1} = \text{if noEvent}(F_{12H_2O_l} >= 0) \text{ then } C_p * F_{12H_2O_l} * M_{h2o} * (T_1 - T_2) \text{ else } C_p * F_{12H_2O_l} * M_{h2o} * (T_2 - T_1)$$

$$F_{conv2} = \text{if noEvent}(F_{12H_2og} >= 0) \text{ then } C_{pv} * F_{12H_2og} * M_{h2o} * (T_1 - T_2) \text{ else } C_{pv} * F_{12H_2og} * M_{h2o} * (T_2 - T_1)$$

</pre>

Ecuaciones que importan desde los conectores:<br>

<pre>

```
C1 = nexo1.Ch2ol
C2 = nexo2.Ch2ol
Po2vc1 = nexo1.Po2
Po2vc2 = nexo2.Po2
Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og
T1 = nexo1.T
T2 = nexo2.T
Eg1 = nexo1.EPSILONG
Eg2 = nexo2.EPSILONG
Ilinea = nexo2.Ilinea
Ie = nexo1.Ie
Ve1 = nexo1.Ve
Vp1 = nexo1.Vp
Vact_1 = nexo1.Vact
Vo2_1 = nexo1.Vo2
SPact = nexo1.SPact
SPo2 = nexo1.SPo2
E = nexo1.E
E1 = nexo1.Enernst
```

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia los conectores:<br>

<pre>

```
nexo1.Fh2ol = F12h2ol
nexo2.Fh2ol = -F12h2ol
nexo1.Fo2 = F12o2
nexo2.Fo2 = -F12o2
nexo1.Fh2og = F12h2og
nexo2.Fh2og = -F12h2og
nexo1.Ilinea = Ilinea
nexo2.Ie = -Ie
nexo2.Ve = Ve2
nexo2.Vp = Vp2
nexo2.Vact = Vact_2
nexo2.Vo2 = Vo2_2
nexo2.Enernst = E2
nexo1.Fj = -G
nexo2.Fj = -G
nexo1.Fcond = Fcond
nexo2.Fcond = -Fcond
nexo1.Fc1 = Fconv1
nexo2.Fc1 = -Fconv1
nexo1.Fc2 = Fconv2
nexo2.Fc2 = -Fconv2
```

</pre>

Además de los siguientes parámetros:

</html>", revisions="<html>En lo referente a la porosidad del material, en este texto la denominación EPSILONporos.<br>

En el gui3n de pr3cticas se denomina tambi3n EPSILONs.<br>

Los valores para los par3metros que faltaban en el gui3n son los siguientes:<br>

<pre>

Dh2ol = 3.5e-11(m2/s)<br>

Do2h2og\_ref = 2.82e-3(m2/s)<br>

Pg\_ref = 1e5(Pa)<br>

Tg\_ref = 308.1(°K)<br>

</pre><br>

Incorpora la importaci3n de EPSILONg para calcular la difusi3n de los gases.<br>

Se ha cambiado la expresi3n de la presi3n de los gases desde una f3rmula basada en eventos, a otra basada en la media cuadr3tica.

Eso incrementar3 el rendimiento.<br>

Se han incorporado los c3lculos de sobrepotencial ohmico electr3nico.

En la versi3n 1.2, se incluyen las ecuaciones de conducci3n y convecci3n t3rmicas.

Tambi3n se ha intentado disminuir el n3mero de descripciones basadas en eventos.

Se incluyen nuevos fen3menos tales como el fen3meno de arrastre electrosm3tico, la variaci3n del potencial en funci3n de la temperatura o la variaci3n de la conductividad prot3nica en funci3n de la humedad del Nafion.

</html>"));

constant unidades2.constante\_gas\_ideal R = constantes.R;

parameter unidades.Area Svc=1;

parameter unidades.Length Ltot=1.6e-3;

parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ol=3.5e-9;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Do2h2og\_ref=2.82e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2h2og\_ref=0;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Do2k=7.853e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2k=0;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ogk=1.047e-3;

parameter unidades2.porosidad EPSILONs=0.4;

parameter unidades.Pressure Pg\_ref(displayUnit="Pa")=1e5;

parameter unidades.Temp\_K Tg\_ref=308.1;

parameter unidades2.tortuosidad TAU=1;

parameter unidades.Conductivity SIGMAe=1e4;

parameter unidades.ThermalConductivity SIGMAt=1.59;

parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=4181 "agua l3quida";

parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cpv=2080 "agua vapor";

parameter Real NUMvc=20 "Numero de vol3menes de control";

unidades2.concentracion\_molar C1;

unidades2.concentracion\_molar C2;

unidades.DiffusionCoefficient Do2h2og;

unidades.DiffusionCoefficient Dh2h2og;

unidades2.Fneto F12h2ol;

unidades2.Fneto F12o2;

unidades2.Fneto F12h2;

unidades2.Fneto F12h2og;

unidades2.Cneta Jo2;

unidades2.Cneta Jh2;  
 unidades2.Cneta Jh2og;  
 unidades.Pressure Po2( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Po2vc1( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Po2vc2( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Ph2( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Ph2vc1( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Ph2vc2( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Ph2og( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Ph2ogvc1( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Ph2ogvc2( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Pg(displayUnit="Pa");  
 unidades.Temperature Tg;  
 unidades.Temperature T1;  
 unidades.Temperature T2;  
 unidades.Length Lvc;  
 unidades2.porosidad Eg1;  
 unidades2.porosidad Eg2;  
 unidades2.porosidad EPSILONg;  
 unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
 unidades.ElectricCurrent Ip;  
 unidades.ElectricPotential SPe;  
 unidades.ElectricPotential Ve1;  
 unidades.ElectricPotential Ve2;  
 unidades.ElectricPotential Vp1;  
 unidades.ElectricPotential Vp2;  
 unidades.ElectricPotential SPP;  
 unidades.ElectricPotential SPact;  
 unidades.ElectricPotential SPO2;  
 unidades.ElectricPotential Vo2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vo2\_2;  
 unidades.ElectricPotential SPh2;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_2;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential E1;  
 unidades.ElectricPotential E2;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;  
 unidades.EnergyFlowRate Ge;  
 unidades.EnergyFlowRate G;  
 unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv2;

equation

$L_{vc} = L_{tot}/NUM_{vc}$ ; //-----

Caracterización geométrica del material

$EPSILONg = \sqrt{(Eg1^2 + Eg2^2)/2}$ ;

$F_{12H_2O} = S_{vc} * D_{h2O} * (C_1 - C_2) / L_{vc}; //$ -----  
----Difusión del agua líquida

$P_{O_2} = \sqrt{(P_{O_2vc1}^2 + P_{O_2vc2}^2) / 2}; //$ -----  
--Difusión del oxígeno  
 $J_{O_2} = (P_{O_2vc1} - P_{O_2vc2}) * \epsilon * D_{O_2k} * D_{O_2h2O} / (L_{vc} * (T_{AU}^2) * R * T_g * (D_{O_2h2O} + D_{O_2k}) + 1e-20);$   
 $F_{12O_2} = J_{O_2} * S_{vc};$

$P_{H_2} = \sqrt{(P_{H_2vc1}^2 + P_{H_2vc2}^2) / 2}; //$ -----  
--Difusión del hidrógeno  
 $J_{H_2} = (P_{H_2vc1} - P_{H_2vc2}) * \epsilon * D_{H_2k} * D_{H_2h2O} / (L_{vc} * (T_{AU}^2) * R * T_g * (D_{H_2h2O} + D_{H_2k}) + 1e-20);$   
 $F_{12H_2} = J_{H_2} * S_{vc};$

$P_{H_2og} = \sqrt{(P_{H_2ogvc1}^2 + P_{H_2ogvc2}^2) / 2}; //$ -----  
----Difusión del vapor de agua  
 $J_{H_2og} = (P_{H_2ogvc1} - P_{H_2ogvc2}) * \epsilon * D_{H_2ogk} * D_{O_2h2O} / (L_{vc} * (T_{AU}^2) * R * T_g * (D_{O_2h2O} + D_{H_2ogk}))$   
 $F_{12H_2og} = J_{H_2og} * S_{vc};$

$P_g = P_{O_2} + P_{H_2og}; //$ -----  
Difusión binaria  
 $T_g = (T_1 + T_2) / 2;$   
 $D_{O_2h2O} = D_{O_2h2O\_ref} * (P_g / P_{g\_ref}) * ((T_g / T_{g\_ref})^{1.5});$   
 $D_{H_2h2O} = D_{H_2h2O\_ref} * (P_g / P_{g\_ref}) * ((T_g / T_{g\_ref})^{1.5});$

$S_{Pe} = (I_e * L_{vc}) / (S_{vc} * \sigma_a * \epsilon); //$ -----  
-----Cálculo de los sobrepotenciales ohmicos  
 $V_{e2} = V_{e1} + S_{Pe};$

$I_p = I_{linea} - I_e;$   
 $S_{Pp} = 0;$   
 $V_{p2} = V_{p1} + S_{Pp};$

$V_{act\_2} = V_{act\_1} + S_{Pact}; //$ -----  
Integración de los sobrepotenciales de activación y depresión.  
 $V_{O_2\_2} = V_{O_2\_1} + S_{Po_2};$   
 $V_{H_2\_2} = V_{H_2\_1} + S_{Ph_2};$

$E_2 = E_1 + E; //$ -----  
Integración del potencial de Nernst

$G_e = I_e * S_{Pe}; //$ -----  
Efecto Joule  
 $G = G_e / 2;$

Fcond = SIGMA<sub>t</sub>\*S<sub>vc</sub>\*(T1-T2)/L<sub>vc</sub>; //-----  
-----Conducción térmica

Fconv1 = if noEvent(F12h2ol>=0) then Cp\*F12h2ol\*Mh2o\*(T1-T2) else  
Cp\*F12h2ol\*Mh2o\*(T2-T1); //Convección  
Fconv2 = if noEvent(F12h2og>=0) then Cp<sub>v</sub>\*F12h2og\*Mh2o\*(T1-T2) else  
Cp<sub>v</sub>\*F12h2og\*Mh2o\*(T2-T1);

C1 = nexo1.Ch2ol; //-----  
Importamos

C2 = nexo2.Ch2ol;  
Po2vc1 = nexo1.Po2;  
Po2vc2 = nexo2.Po2;  
Ph2vc1 = nexo1.Ph2;  
Ph2vc2 = nexo2.Ph2;  
Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og;  
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og;  
T1 = nexo1.T;  
T2 = nexo2.T;  
Eg1 = nexo1.EPSILONg;  
Eg2 = nexo2.EPSILONg;  
Ilinea = nexo2.Ilinea;  
Ie = nexo1.Ie;  
Ve1 = nexo1.Ve;  
Vp1 = nexo1.Vp;  
Vact\_1 = nexo1.Vact;  
Vo2\_1 = nexo1.Vo2;  
Vh2\_1 = nexo1.Vh2;  
SPact = nexo1.SPact;  
SPo2 = nexo1.SPo2;  
SPh2 = nexo1.SPh2;  
E = nexo1.E;  
E1 = nexo1.Eernst;

nexo1.Fh2ol = F12h2ol; //-----  
Exportamos

nexo2.Fh2ol = -F12h2ol;  
nexo1.Fo2 = F12o2;  
nexo2.Fo2 = -F12o2;  
nexo1.Fh2 = F12h2;  
nexo2.Fh2 = -F12h2;  
nexo1.Fh2og = F12h2og;  
nexo2.Fh2og = -F12h2og;  
nexo1.Ilinea = Ilinea;  
nexo2.Ie = -Ie;  
nexo2.Ve = Ve2;  
nexo2.Vp = Vp2;  
nexo2.Vact = Vact\_2;  
nexo2.Vo2 = Vo2\_2;

```

nexo2.Vh2 = Vh2_2;
nexo2.Enernst = E2;
nexo1.Fj = -G;
nexo2.Fj = -G;
nexo1.Fcond = Fcond;
nexo2.Fcond = -Fcond;
nexo1.Fc1 = Fconv1;
nexo2.Fc1 = -Fconv1;
nexo1.Fc2 = Fconv2;
nexo2.Fc2 = -Fconv2;

```

```
end TD_difusora;
```

```
model VC_anodica
```

```
"Modela gases, liquidos y corrientes, contenidos en un pequeño volumen"
```

```
nexo nexo1 annotation (extent=[-30,-110; 30,-50]);
```

```
annotation (Coordsys(
  extent=[-100, -100; 100, 100],
  grid=[2, 2]),
```

```
Icon(Rectangle(extent=[-60,58; 60,-42], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=30,
  rgbfillColor={215,215,215},
  fillPattern=1)),
```

```
Rectangle(extent=[-2,-62; 2,-42], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=0,
  rgbfillColor={0,0,0},
  fillPattern=1)),
```

```
Text(
  extent=[-100,60; 100,100],
  string="%name",
  style(
    color=58,
    rgbcolor={0,127,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215},
    fillPattern=1))),
```

```
DymolaStoredErrors,
```

```
Documentation(info="<html>
```

```
El volumen de control es la unidad mínima en la que dividimos el material.<br>
```

```
Tiene un único conector por el que entran o salen los gases al volumen.<br>
```

```
El flujo es positivo cuando el gas o la corriente entran en el volumen.<br><br>
```

```
Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>
```

```
Ecuaciones de evolución de las variables de estado:<br>
```

```
<pre>
```

```
der(No2) = Fo2+Greaco2
```

```

der(Nh2og) = Fh2og+Gh2og+Greach2og
der(Nh2ol) = Fh2ol+Gh2ol
der(T) = (Fconv+Fcond+Gt+Gv)/(Cp*RHOs*Svc*Lvc)

```

</pre>

Ecuaciones de la temperatura:<br>

```

<pre>

```

```

Gt = Ilinea*SPact+Gj
Fconv = Fconv1+Fconv2

```

```

</pre>

```

Ecuaciones de cálculo de los sobrepotenciales:<br>

```

<pre>

```

```

Ge = -Ilinea/NUMvc
Greaco2 = Ge/(4*F)
Greach2og = -Ge/(2*F)
Ie = -Ge
Pxo2 = (1-CHIrel)*Po2
SPo2max = ((C1*Modelica.Math.exp((P0o2/(Pcorte-Pinf))-C2) - C3)/A)/NUMvc
SPact = B*Modelica.Math.log(1+(Ilinea/AactI0ref))/NUMvc
SPo2 = if noEvent(Pxo2 mi Pcorte) then SPo2max
      else ((C1*Modelica.Math.exp((P0o2/(Pxo2-Pinf))-C2) - C3) / A)/NUMvc

```

```

</pre>

```

Cálculo del potencial de Nernst:<br>

```

<pre>

```

```

E = -((DELTAh/(2*F))-(DELTAh/(2*F))*T)/NUMvc

```

```

</pre>

```

Ecuaciones referentes al agua líquida:<br>

```

<pre>

```

```

Nh2ol = Mh2ol/Mh2o
Vh2ol = Mh2ol/RHOh2ol
Ch2ol = Nh2ol/Vvc
CHI = Mh2ol/Ms
CHImax = RHOh2ol*Vporos/Ms
CHIrel = CHI/CHImax
Nh2ol_max = RHOh2ol*Vporos/Mh2o
Ch2ol_max = Nh2ol_max/Vvc
Ms = Vvc*RHOs
Gh2ol = Vg*ALFAv*BETA*(Ph2og-Psath2o)/(R*T)
Gh2og = -Gh2ol
Psath2o = P0sath2o*Modelica.Math.exp((T-T0sat)*Lv/(R*T*T0sat))
Lv = 3.1192e4+1.854018e2*T-8.05959e-1*T^2+1.379322e-3*T^3-9.9104399e-7*T^4
Gv = -Lv*Gh2og

```

```

</pre>

```

Ecuaciones de estado de los gases en condiciones ideales:<br>

```

<pre>

```

```

Po2*Vg = No2*R*T
Ph2og*Vg = Nh2og*R*T

```

```

</pre>

```

Ecuaciones que caracterizan geoméricamente el material poroso:<br>

```

<pre>

```

```

Vvc = Svc*Lvc

```

```
Lvc = Ltot/NUMvc
EPSILONporos = Vporos/Vvc
EPSILONg = Vg/Vvc
Vporos = Vg+Vh2ol
```

</pre>

Ecuaciones que importan desde el conector:<br>

<pre>

```
Fo2 = nexo1.Fo2
Fh2og = nexo1.Fh2og
Fh2ol = nexo1.Fh2ol
Ilinea = nexo1.Ilinea
Vact = nexo1.Vact
Vo2 = nexo1.Vo2
Ve = nexo1.Ve
Vp = nexo1.Vp
Gj = nexo1.Fj
Fcond = nexo1.Fcond
Fconv1 = nexo1.Fc1
Fconv2 = nexo1.Fc2
```

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia el conector:<br>

<pre>

```
nexo1.Po2 = Po2
nexo1.Ph2og = Ph2og
nexo1.Psath2o = Psath2o
nexo1.Ch2ol = Ch2ol
nexo1.T = T
nexo1.EPSILONg = EPSILONg
nexo1.SPact = SPact
nexo1.SPo2 = SPo2
nexo1.Ie = -Ie
nexo1.E = E
```

</pre>

</html>", revisions="<html> Con respecto a la ecuación de la presión de saturación del agua (Clasius-Clapeiron integrada):<br>

Psath2o = P0sath2o\*Modelica.Math.exp(((1/T0sat)-(1/T))\*Lv\*Mh2o/R)<br>

Tras una consulta con Alfonso Urquia 27/7/2011, eliminamos la masa molecular del agua Mh2o de la fórmula debido a que es dimensionalmente inconsistente, se trata de una errata.<br><br>

Se ha cambiado el valor de la superficie de condensación por el de ALFAv = 1e-2; debido a que se planteaba un valor demasiado elevado.<br><br>

La generación de agua líquida (Gh2ol) se hace proporcional a Vg y no a Vvc.<br><br>

La fórmula que daba la evolución de la entalpía de vaporización daba resultados irreales. La definitiva es  $L_v = 3.1192e4 + 1.854018e2 * T - 8.05959e-1 * T^2 + 1.379322e-3 * T^3 - 9.9104399e-7 * T^4$ .<br><br>

También se exporta el valor de EPSILONg para calcular la difusión de los gases en el modelo transporte\_x\_difusion.<br><br>

En la última versión (1.1), se incluyen los cálculos de los sobrepotenciales de activación y subpresión (concentración) de oxígeno, de forma separada.<br>

También se inicializan los valores de algunas variables en una nueva sección initial equation.

En la versión (1.2), se incluyen las ecuaciones con la dinámica de la temperatura en función de los flujos conductivo y convectivo, además de la energía de vaporización del agua líquida. Por eso el parámetro temperatura ahora referencia a la temperatura inicial de la pila.

</html>"));

```
constant unidades2.constante_gas_ideal R = constantes.R;  
constant unidades.FaradayConstant F=96485;
```

```
parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;  
parameter unidades.Density RHOH2O=972; //Falta fijar  
valores!!!!
```

```
parameter unidades.Density RHOs=4000;  
parameter unidades.Temp_K T0=353;  
parameter unidades.Temp_K T0sat=298.16;  
parameter unidades2.porosidad EPSILONporos=0.4;  
parameter unidades.Length Ltot=4e-5;  
parameter unidades.Area Svc=1;  
parameter unidades2.superficie_condensacion ALFAv=1e-2;  
parameter unidades2.transferencia_materia BETA=1e-3;  
parameter unidades2.carga_agua CHIinicial=0.01;  
parameter unidades2.moles No2inicial=0;  
parameter unidades2.moles Nh2inicial=1e-5;  
parameter unidades2.moles Nh2oginicial=1e-7;  
parameter unidades.Pressure P0sath2o=3169;  
parameter unidades.Pressure P0h2=1e5;  
parameter unidades2.densidad_generacion_electrica AactI0ref=1.2;  
parameter unidades.ElectricPotential B=0.02;  
parameter unidades.ElectricPotential C1=1;  
parameter Real C2=2.5 "1";  
parameter unidades.ElectricPotential C3=1;  
parameter unidades.Pressure Pcorte=65000;  
parameter unidades.Pressure Pinf = 52000;  
parameter Real A=6;  
parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=1047  
"polímero plástico (teflon)";  
parameter Real NUMvc=20 "Número de volúmenes de control";
```

```
unidades2.Fneto Fo2;  
unidades2.Fneto Fh2;  
unidades2.Fneto Fh2og;  
unidades2.Fneto Fh2ol;  
unidades2.moles No2;  
unidades2.moles Nh2;  
unidades2.moles Nh2og;  
unidades2.moles Nh2ol;  
unidades2.moles Nh2ol_max;  
unidades2.concentracion_molar Ch2ol;
```

unidades2.concentracion\_molar Ch2ol\_max;  
 unidades2.generacion Gh2og;  
 unidades2.generacion Gh2ol;  
 unidades2.generacion Greach2;  
 unidades2.generacion\_electrica Ge;  
 unidades.EnergyFlowRate Gt;  
 unidades.EnergyFlowRate Gj;  
 unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv2;  
 unidades.EnergyFlowRate Gv;  
 unidades.ElectricPotential Vact;  
 unidades.ElectricPotential SPact;  
 unidades.ElectricPotential Vo2;  
 unidades.ElectricPotential Vh2;  
 unidades.ElectricPotential SPo2;  
 unidades.ElectricPotential SPh2;  
 unidades.ElectricPotential Ve;  
 unidades.ElectricPotential Vp;  
 unidades.ElectricPotential SPo2max;  
 unidades.ElectricPotential SPh2max;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential Enernst;  
 unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;  
 unidades2.entalpia\_molar Lv;  
 unidades.Mass Mh2ol;  
 unidades.Mass Ms;  
 unidades.Volume Vh2ol;  
 unidades.Volume Vg;  
 unidades.Volume Vporos;  
 unidades.Volume Vvc;  
 unidades.Length Lvc;  
 unidades2.porosidad EPSILONg;  
 unidades2.carga\_agua CHI;  
 unidades2.carga\_agua CHImax;  
 unidades2.carga\_agua CHIrel;  
 unidades.Pressure Po2;  
 unidades.Pressure Ph2;  
 unidades.Pressure Pxo2;  
 unidades.Pressure Pxh2;  
 unidades.Pressure Ph2og;  
 unidades.Pressure Psath2o;  
 unidades.Temp\_K T;

equation

der(No2) = Fo2; //-----

----Evolución de las variables de estado de los gases

der(Nh2og) = Fh2og+Gh2og;

der(Nh2ol) = Fh2ol+Gh2ol;  
der(Nh2) = Fh2+Greach2;

der(T) = (Fconv+Fcond+Gt+Gv)/(Cp\*RHOs\*Svc\*Lvc); //-----  
-----Evolución de la temperatura

Gt = Ilinea\*SPact+Gj;  
Fconv = Fconv1+Fconv2;

Ge = -Ilinea/NUMvc; //-----  
-----Cálculo de los sobrepotenciales de activación y depresión de hidrógeno

Greach2 = Ge/(4\*F);  
Ie = 0;  
PxO2 = 0;  
Pxm2 = if noEvent(CHIrel>=0) then Ph2\*sqrt(1-CHIrel) else Ph2\*sqrt(1+CHIrel);  
SPo2max = 0;  
SPH2max = ((C1\*Modelica.Math.exp((P0h2/(Pcorte-Pinf))-C2) - C3)/A)/NUMvc;  
SPact = B\*Modelica.Math.log(1+(Ilinea/AactI0ref))/NUMvc;  
SPo2 = 0;  
SPH2 = if noEvent(Pxm2<=Pcorte) then SPH2max else  
((C1\*Modelica.Math.exp((P0h2/(Pxm2-Pinf))-C2) - C3) /  
A)/NUMvc;

E = 0; //-----  
No se genera potencial de Nernst

Nh2ol = Mh2ol/Mh2o; //-----  
-----Agua líquida

Vh2ol = Mh2ol/RHOH2ol;  
Ch2ol = Nh2ol/Vvc;  
CHI = Mh2ol/Ms;  
CHImax = RHOH2ol\*Vporos/Ms;  
CHIrel = CHI/CHImax;  
Nh2ol\_max = RHOH2ol\*Vporos/Mh2o;  
Ch2ol\_max = Nh2ol\_max/Vvc;  
Ms = Vvc\*RHOs;  
Gh2ol = Vg\*ALFAv\*BETA\*(Ph2og-Psath2o)/(R\*T);  
Gh2og = -Gh2ol;  
Psath2o = P0sath2o\*Modelica.Math.exp((T-T0sat)\*Lv/(R\*T\*T0sat));  
Lv = 3.1192e4+1.854018e2\*T-8.05959e-1\*T^2+1.379322e-3\*T^3-9.9104399e-  
7\*T^4;  
Gv = -Lv\*Gh2og;

Po2\*Vg = No2\*R\*T; //-----  
-----Ecuaciones de estado de los gases

Ph2og\*Vg = Nh2og\*R\*T;  
Ph2\*Vg = Nh2\*R\*T;

Vvc = Svc\*Lvc; //-----  
-----Caracterización geométrica del material

```
Lvc = Ltot/NUMvc;  
EPSILONporos = Vporos/Vvc;  
EPSILONg = Vg/Vvc;  
Vporos = Vg+Vh2ol;
```

```
Fo2 = nexo1.Fo2; //-----
```

```
----Importamos desde el conector
```

```
Fh2 = nexo1.Fh2;  
Fh2og = nexo1.Fh2og;  
Fh2ol = nexo1.Fh2ol;  
Ilinea = nexo1.Ilinea;  
Vact = nexo1.Vact;  
Vo2 = nexo1.Vo2;  
Vh2 = nexo1.Vh2;  
Ve = nexo1.Ve;  
Vp = nexo1.Vp;  
Gj = nexo1.Fj;  
Fcond = nexo1.Fcond;  
Fconv1 = nexo1.Fc1;  
Fconv2 = nexo1.Fc2;  
Enernst = nexo1.Eernst;
```

```
nexo1.Po2 = Po2; //-----
```

```
----Exportamos al conector
```

```
nexo1.Ph2 = Ph2;  
nexo1.Ph2og = Ph2og;  
nexo1.Psath2o = Psath2o;  
nexo1.Ch2ol = Ch2ol;  
nexo1.T = T;  
nexo1.EPSILONg = EPSILONg;  
nexo1.SPact = SPact;  
nexo1.SPo2 = SPo2;  
nexo1.SPh2 = SPh2;  
nexo1.Ie = -Ie;  
nexo1.E = E;
```

```
initial equation
```

```
CHI = CHIinicial;  
No2 = No2inicial;  
Nh2 = Nh2inicial;  
Nh2og = Nh2oginicial;  
T = T0;
```

```
end VC_anodica;
```

```
model TD_anodica
```

```
"Transporte por difusion de dos gases, un liquido y corrientes, en un medio poroso."
```

```
nexo nexo1 "A"
```

```

        annotation (extent=[-100,-20; -60,20]);
nexo nexo2 "B"
        annotation (extent=[60,-20; 100,20]);
annotation (Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],
    grid=[2, 2]),
    Icon(Polygon(points=[-66,0; -40,40; -40,20; 40,20; 40,40; 66,0; 40,
        -40; 40,-20; -40,-20; -40,-40; -66,0],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215})),
    Text(
        extent=[-80,-80; 80,-60],
        style(
            color=58,
            rgbcolor={0,127,0},
            fillColor=30,
            rgbfillColor={215,215,215},
            fillPattern=1),
        string="%name"),
    Text(
        extent=[-90,30; -70,50],
        string="A",
        style(
            color=42,
            rgbcolor={127,0,0},
            fillColor=44,
            rgbfillColor={255,170,170},
            fillPattern=1)),
    Text(
        extent=[70,30; 90,50],
        style(
            color=42,
            rgbcolor={127,0,0},
            fillColor=44,
            rgbfillColor={255,170,170},
            fillPattern=1),
        string="B"),
    Text(
        extent=[-22,-10; -2,10],
        style(
            color=42,
            rgbcolor={127,0,0},
            fillColor=44,
            rgbfillColor={255,170,170},
            fillPattern=1),
        string="+"),
    Line(points=[-2,0; 18,0; 12,4; 12,-4; 18,0], style(

```

```

color=42,
rgbcolor={127,0,0},
fillColor=44,
rgbfillColor={255,170,170},
fillPattern=1))),

```

```

Diagram,
DymolaStoredErrors,
Documentation(info="<html>

```

El fenómeno de transporte describe la difusión de dos gases, un líquido y las corrientes electrónica y protónica, a través de un material poroso.<br>

Tiene dos conectores que representan las superficies de los volúmenes de control (superficies de control).<br>

El flujo es positivo cuando las especies cruzan desde A hacia B.<br><br>

Está definido por (ver también las revisiones):<br><br>

Ecuaciones de caracterización geométrica del material:<br>

```

<pre>
Lvc = Ltot/NUMvc
EPSILONg = sqrt((Eg1^2+Eg2^2)/2)
</pre>

```

Ecuaciones referentes a la difusión binaria:<br>

```

<pre>
Pg = Po2+Ph2og
Tg = (T1+T2)/2
Do2h2og = Do2h2og_ref*(Pg/Pg_ref)*((Tg/Tg_ref)^1.5)
</pre>

```

Ecuaciones de difusión del agua líquida:<br>

```

<pre>
F12h2ol = Svc*Dh2ol*(C1-C2)/Lvc
F12eo = 5*Ip/F
</pre>

```

Ecuaciones de difusión del oxígeno:<br>

```

<pre>
Po2 = sqrt((Po2vc1^2+Po2vc2^2)/2)
(Po2vc1-Po2vc2)/Lvc = R*Tg*(TAU^2)*((1/Do2k)+(1/Do2h2og))*Jo2/EPSILONg
F12o2 = Jo2*Svc
</pre>

```

Ecuaciones de difusión del vapor de agua:<br>

```

<pre>
Ph2og = sqrt((Ph2ogvc1^2+Ph2ogvc2^2)/2)
Psath2o = sqrt((Psath2ovc1^2+Psath2ovc2^2)/2)
Jh2og = (Ph2ogvc1-
Ph2ogvc2)*EPSILONg*Dh2ogk*Do2h2og/(Lvc*(TAU^2)*R*Tg*(Do2h2og+Dh2ogk)
)
F12h2og = Jh2og*Svc
</pre>

```

Ecuaciones de cálculo de los sobrepotenciales ohmicos:<br>

```

<pre>
SPE = (Ie*Lvc)/(Svc*SIGMAe*EPSILONs)
Ve2 = Ve1 + SPE
Ip = Ilinea-Ie

```

```

ALFA = Ph2og/Psath2o
LAMBDAm = 0.043+17.81*ALFA-39.85*(ALFA)^2+36*(ALFA)^3
b1 = b11*LAMBDAm-b12
Kp = b1*Modelica.Math.exp(b2*((Tg-t2)/(Tg*t2)))
SPp = (Ip*Lvc)/(Svc*Kp*EPSILONe)
Vp2 = Vp1 + SPp

```

Ecuaciones de integración de los sobrepotenciales de activación y subpresión (concentración) de oxígeno:<br>

```

Vact_2 = Vact_1+SPact
Vo2_2 = Vo2_1+SPo2

```

Integración del potencial de Nernst:<br>

```

E2 = E1+E

```

Ecuaciones del efecto Joule:<br>

```

Gp = Ip*SPp
Ge = Ie*SPE
G = (Gp+Ge)/2

```

Ecuaciones de conducción y convección térmicas:<br>

```

Fcond = SIGMAAt*Svc*(T1-T2)/Lvc
Fconv1 = if noEvent(F12h2ol>=0) then Cp*F12h2ol*Mh2o*(T1-T2) else
Cp*F12h2ol*Mh2o*(T2-T1)
Fconv2 = if noEvent(F12h2og>=0) then Cpv*F12h2og*Mh2o*(T1-T2) else
Cpv*F12h2og*Mh2o*(T2-T1)

```

Ecuaciones que importan desde los conectores:<br>

```

C1 = nexo1.Ch2ol
C2 = nexo2.Ch2ol
Po2vc1 = nexo1.Po2
Po2vc2 = nexo2.Po2
Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og
Psath2ovc1 = nexo1.Psath2o
Psath2ovc2 = nexo2.Psath2o
T1 = nexo1.T
T2 = nexo2.T
Eg1 = nexo1.EPSILONG
Eg2 = nexo2.EPSILONG
Ilinea = nexo2.Ilinea
Ie = nexo1.Ie
Ve1 = nexo1.Ve
Vp1 = nexo1.Vp
Vact_1 = nexo1.Vact

```

```
Vo2_1 = nexo1.Vo2
SPact = nexo1.SPact
SPo2 = nexo1.SPo2
E = nexo1.E
E1 = nexo1.Enernst
```

</pre>

Ecuaciones que exportan hacia los conectores:<br>

<pre>

```
nexo1.Fh2o1 = F12h2o1
nexo2.Fh2o1 = -F12h2o1
nexo1.Fo2 = F12o2
nexo2.Fo2 = -F12o2
nexo1.Fh2og = F12h2og
nexo2.Fh2og = -F12h2og
nexo1.Ilinea = Ilinea
nexo2.Ie = -Ie
nexo2.Ve = Ve2
nexo2.Vp = Vp2
nexo2.Vact = Vact_2
nexo2.Vo2 = Vo2_2
nexo2.Enernst = E2
nexo1.Fj = -G
nexo2.Fj = -G
nexo1.Fcond = Fcond
nexo2.Fcond = -Fcond
nexo1.Fc1 = Fconv1
nexo2.Fc1 = -Fconv1
nexo1.Fc2 = Fconv2
nexo2.Fc2 = -Fconv2
```

</pre>

Además de los siguientes parámetros:

</html>", revisions="<html>En lo referente a la porosidad del material, en este texto la denominación EPSILONporos.<br>

En el guión de prácticas se denomina también EPSILONs.<br>

Los valores para los parámetros que faltaban en el guión son los siguientes:<br>

<pre>

```
Dh2o1 = 3.5e-11(m2/s)<br>
Do2h2og_ref = 2.82e-3(m2/s)<br>
Pg_ref = 1e5(Pa)<br>
Tg_ref = 308.1(°K)<br>
```

</pre><br>

Incorpora la importación de EPSILONg para calcular la difusión de los gases.<br>

Se ha cambiado la expresión de la presión de los gases desde una fórmula basada en eventos, a otra basada en la media cuadrática.

Eso incrementará el rendimiento.<br>

Se han incorporado los cálculos de sobrepotencial de activación y subpresión de oxígeno (versión 1.1).

En la versión 1.2, se incluyen las ecuaciones de conducción y convección térmicas. También se ha intentado disminuir el número de descripciones basadas en eventos.

Se incluyen nuevos fenómenos tales como el fenómeno de arrastre electroosmótico, la variación del potencial en función de la temperatura o la variación de la conductividad protónica en función de la humedad del Nafion.

</html>"));

constant unidades2.constante\_gas\_ideal R = constantes.R;

constant unidades.FaradayConstant F=96485;

parameter unidades.Area Svc=1;

parameter unidades.Length Ltot=4e-5;

parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ol=2.5e-11;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2h2og\_ref=2.82e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2k=7.853e-3;

parameter unidades.DiffusionCoefficient Dh2ogk=1.047e-3;

parameter unidades2.porosidad EPSILONs=0.6;

parameter unidades2.porosidad EPSILONe=0.2;

parameter unidades.Pressure Pg\_ref(displayUnit="Pa")=1e5;

parameter unidades.Temp\_K Tg\_ref=308.1;

parameter unidades2.tortuosidad TAU=5;

parameter unidades.ThermalConductivity SIGMAt=0.0586;

parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp=4181 "agua líquida";

parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cpv=2080 "agua vapor";

parameter unidades.Conductivity b11=0.5139;

parameter unidades.Conductivity b12=0.3260;

parameter unidades.Temp\_K b2=1268;

parameter unidades.Temp\_K t2=303;

parameter unidades2.solvatacion S=5;

parameter Real NUMvc=20 "Numero de volúmenes de control";

unidades2.concentracion\_molar C1;

unidades2.concentracion\_molar C2;

unidades.DiffusionCoefficient Dh2h2og;

unidades2.Fneto F12h2ol;

unidades2.Fneto F12o2;

unidades2.Fneto F12h2;

unidades2.Fneto F12h2og;

unidades2.Fneto F12eo;

unidades2.Cneta Jo2;

unidades2.Cneta Jh2;

unidades2.Cneta Jh2og;

unidades.Pressure Po2( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Ph2( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Po2vc1( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Po2vc2( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Ph2vc1( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Ph2vc2( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Ph2og( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Ph2ogvc1( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Ph2ogvc2( displayUnit="Pa");

unidades.Pressure Psath2o( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Psath2ovc1( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Psath2ovc2( displayUnit="Pa");  
 unidades.Pressure Pg(displayUnit="Pa");  
 unidades.Temperature Tg;  
 unidades.Temperature T1;  
 unidades.Temperature T2;  
 unidades.Length Lvc;  
 unidades2.porosidad Eg1;  
 unidades2.porosidad Eg2;  
 unidades2.porosidad EPSILONg;  
 unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
 unidades.ElectricCurrent Ip;  
 unidades.ElectricPotential SPe;  
 unidades.ElectricPotential Ve1;  
 unidades.ElectricPotential Ve2;  
 unidades.ElectricPotential Vp1;  
 unidades.ElectricPotential Vp2;  
 unidades.ElectricPotential SPp;  
 unidades.ElectricPotential SPact;  
 unidades.ElectricPotential SPo2;  
 unidades.ElectricPotential SPH2;  
 unidades.ElectricPotential Vo2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vo2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vh2\_2;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_1;  
 unidades.ElectricPotential Vact\_2;  
 unidades.ElectricPotential E;  
 unidades.ElectricPotential E1;  
 unidades.ElectricPotential E2;  
 unidades.ElectricCurrent Ie;  
 unidades.Conductivity Kp;  
 unidades.Conductivity b1;  
 unidades2.hidratacion LAMBDAm;  
 unidades2.humedad\_relativa ALFA;  
 unidades.EnergyFlowRate Gp;  
 unidades.EnergyFlowRate Ge;  
 unidades.EnergyFlowRate G;  
 unidades.EnergyFlowRate Fcond;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv1;  
 unidades.EnergyFlowRate Fconv2;

equation

$L_{vc} = L_{tot}/NUM_{vc}$ ; //-----

-Caracterización geométrica del material

$EPSILON_g = \sqrt{(Eg1^2 + Eg2^2)/2}$ ;

$F12_{h2o1} = (S_{vc} * Dh_{2o1} * (C1 - C2) / L_{vc}) + F12_{eo}$ ; //-----

-----Difusión del agua líquida

```

F12eo = S*Ip/F;

Po2 = sqrt((Po2vc1^2+Po2vc2^2)/2); //-----
----Difusión del oxígeno
Jo2 = 0;
F12o2 = 0;

Ph2 = sqrt((Ph2vc1^2+Ph2vc2^2)/2); //-----
----Difusión del hidrógeno
Jh2 = (Ph2vc1-
Ph2vc2)*EPSILONg*Dh2k*Dh2h2og/(Lvc*(TAU^2)*R*Tg*(Dh2h2og+Dh2k));
F12h2 = Jh2*Svc;

Ph2og = sqrt((Ph2ogvc1^2+Ph2ogvc2^2)/2); //-----
-----Difusión del vapor de agua
Psath2o = sqrt((Psath2ovc1^2+Psath2ovc2^2)/2);
Jh2og = (Ph2ogvc1-
Ph2ogvc2)*EPSILONg*Dh2ogk*Dh2h2og/(Lvc*(TAU^2)*R*Tg*(Dh2h2og+Dh2ogk)
);
F12h2og = Jh2og*Svc;

Pg = Po2+Ph2+Ph2og; //-----
---Difusión binaria
Tg = (T1+T2)/2;
Dh2h2og = Dh2h2og_ref*(Pg/Pg_ref)*((Tg/Tg_ref)^1.5);

SPE = 0; //-----
Cálculo e integración de los sobrepotenciales ohmicos
Ve2 = 0;

Ip = Ilinea-Ie;
ALFA = Ph2og/Psath2o;
LAMBDAm = 0.043+17.81*ALFA-39.85*(ALFA)^2+36*(ALFA)^3;
b1 = b11*LAMBDAm-b12;
Kp = b1*Modelica.Math.exp(b2*((Tg-t2)/(Tg*t2)));
SPp = (Ip*Lvc)/(Svc*Kp*EPSILONe);
Vp2 = Vp1 + SPp;

Vact_2 = Vact_1+SPact; //-----
--Integración de los sobrepotenciales de activación y depresión.
Vo2_2 = Vo2_1+SPo2;
Vh2_2 = Vh2_1+SPh2;

E2 = E1+E; //-----
Integración del potencial de Nernst

Gp = Ip*SPp; //-----
Efecto Joule
Ge = Ie*SPE;
G = (Gp+Ge)/2;

```

```
Fcond = SIGMAAt*Svc*(T1-T2)/Lvc; //-----  
-----Conducción térmica
```

```
Fconv1 = if noEvent(F12h2ol>=0) then Cp*F12h2ol*Mh2o*(T1-T2) else  
Cp*F12h2ol*Mh2o*(T2-T1); //---Convección  
Fconv2 = if noEvent(F12h2og>=0) then Cpv*F12h2og*Mh2o*(T1-T2) else  
Cpv*F12h2og*Mh2o*(T2-T1);
```

```
C1 = nexo1.Ch2ol; //-----  
Importamos
```

```
C2 = nexo2.Ch2ol;  
Po2vc1 = nexo1.Po2;  
Po2vc2 = nexo2.Po2;  
Ph2vc1 = nexo1.Ph2;  
Ph2vc2 = nexo2.Ph2;  
Ph2ogvc1 = nexo1.Ph2og;  
Ph2ogvc2 = nexo2.Ph2og;  
Psath2ovc1 = nexo1.Psath2o;  
Psath2ovc2 = nexo2.Psath2o;  
T1 = nexo1.T;  
T2 = nexo2.T;  
Eg1 = nexo1.EPSILONg;  
Eg2 = nexo2.EPSILONg;  
Ilinea = nexo2.Ilinea;  
Ie = nexo1.Ie;  
Ve1 = nexo1.Ve;  
Vp1 = nexo1.Vp;  
Vact_1 = nexo1.Vact;  
Vo2_1 = nexo1.Vo2;  
Vh2_1 = nexo1.Vh2;  
SPact = nexo1.SPact;  
SPo2 = nexo1.SPo2;  
SPh2 = nexo1.SPh2;  
E = nexo1.E;  
E1 = nexo1.Eernst;
```

```
nexo1.Fh2ol = F12h2ol; //-----  
--Exportamos
```

```
nexo2.Fh2ol = -F12h2ol;  
nexo1.Fo2 = F12o2;  
nexo2.Fo2 = -F12o2;  
nexo1.Fh2 = F12h2;  
nexo2.Fh2 = -F12h2;  
nexo1.Fh2og = F12h2og;  
nexo2.Fh2og = -F12h2og;  
nexo1.Ilinea = Ilinea;  
nexo2.Ie = -Ie;  
nexo2.Ve = Ve2;  
nexo2.Vp = Vp2;
```

```

nexo2.Vact = Vact_2;
nexo2.Vo2 = Vo2_2;
nexo2.Vh2 = Vh2_2;
nexo2.Enernst = E2;
nexo1.Fj = -G;
nexo2.Fj = -G;
nexo1.Fcond = Fcond;
nexo2.Fcond = -Fcond;
nexo1.Fc1 = Fconv1;
nexo2.Fc1 = -Fconv1;
nexo1.Fc2 = Fconv2;
nexo2.Fc2 = -Fconv2;

```

```
end TD_anodica;
```

model terminales "Punto de conexión con un circuito externo."

```

nexo nexo1 "difusora catodo"
    annotation (extent=[40,-80; 80,-40]);
nexo nexo2 "difusora anodo"
    annotation (extent=[-80,-80; -40,-40]);
pin_positivo pin_positivo1 annotation (extent=[40,40; 80,80]);
pin_negativo pin_negativo1 annotation (extent=[-80,40; -40,80]);
annotation (Coordsys(
    extent=[-100, -100; 100, 100],
    grid=[2, 2]),
    Icon(
    Rectangle(extent=[-100,-100; 100,100], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
    Text(
    extent=[20,-40; 100,-20],
    style(color=58, rgbcolor={0,127,0}),
    string="difusora cátodo"),
    Text(
    extent=[-100,-40; -20,-20],
    style(color=58, rgbcolor={0,127,0}),
    string="difusora ánodo"),
    Text(
    extent=[20,20; 100,40],
    style(color=58, rgbcolor={0,127,0}),
    string="cátodo"),
    Text(
    extent=[-100,20; -20,40],
    style(color=58, rgbcolor={0,127,0}),
    string="ánodo")),

```

Documentation(info="<html>En este modelo se introducen las condiciones de contorno para el modelo.<br><br>

También agrupa en un solo componente los terminales eléctricos y los terminales de la pila.<br>

Su finalidad es exportar las tensiones y corrientes a un circuito externo, siendo éste compatible con la librería de Modelica.<br>

Incorpora un arranque retardado para las corrientes y presiones de modo que el modelo compuesto arranque correctamente y en estado estacionario.<br>

El sistema consiste en iniciar la simulación en algún tiempo negativo (de estabilización). Las presiones y concentraciones se irán estabilizando y en el instante  $t=0$  se conecta eléctricamente.<br>

A partir de entonces el modelo está completo.

Tiene cuatro grupos de ecuaciones.<br>

Ecuaciones de caracterización geométrica:<br>

<pre>

$$\text{carga\_agua\_liquida} = \text{Mh2ol}/\text{Ms}$$

$$\text{Ms} = \text{Vvc} * \text{RHOs}$$

$$\text{Vvc} = \text{Svc} * \text{Lvc}$$

$$\text{Lvc} = \text{Ltot}/\text{NUMvc}$$

$$\text{Nh2ol} = \text{Mh2ol}/\text{Mh2o}$$

$$\text{Ch2ol} = \text{Nh2ol}/\text{Vvc}$$

</pre>

Ecuaciones de evolución de las tensiones y la corriente:<br>

<pre>

$$\text{Ilinea} = \text{if time} < 0 \text{ then } 0 \text{ else } \text{Iext}$$

$$\text{P} = \text{Vcc} * \text{Iext}$$

$$\text{Vcc} = \text{E0} - \text{Ve} - \text{Vp} - \text{Vact} - \text{Vo2}$$

$$\text{Vout} = \text{if Vcc} \leq 0 \text{ then } 0 \text{ else } \text{Vcc}$$

</pre>

Ecuaciones de la librería de Modelica:<br>

<pre>

$$\text{pin\_positivo1.v} - \text{pin\_negativo1.v} = \text{Vfin}$$

$$\text{pin\_positivo1.i} = -\text{pin\_negativo1.i}$$

$$-\text{Iext} = \text{pin\_positivo1.i}$$

</pre>

Ecuaciones de exportación:<br>

<pre>

$$\text{nexo1.Po2} = \text{presion\_o2}$$

$$\text{nexo2.Po2} = 1$$

$$\text{nexo1.Ph2og} = \text{presion\_vapor\_agua}$$

$$\text{nexo2.Ph2og} = \text{presion\_vapor\_agua}$$

$$\text{nexo1.Psath2o} = \text{presion\_saturacion\_agua}$$

$$\text{nexo2.Psath2o} = \text{presion\_saturacion\_agua}$$

$$\text{nexo1.Ch2ol} = \text{Ch2ol}$$

$$\text{nexo2.Ch2ol} = \text{Ch2ol}$$

$$\text{nexo1.T} = \text{T}$$

$$\text{nexo2.T} = \text{T}$$

$$\text{nexo1.EPSILONg} = \text{EPSILONg}$$

$$\text{nexo2.EPSILONg} = \text{EPSILONg}$$

$$\text{nexo2.Vp} = 0$$

$$\text{nexo1.Ilinea} = \text{Ilinea}$$

$$\text{nexo2.Ie} = 0$$

$$\text{nexo2.Ve} = 0$$

$$\text{nexo2.Vact} = 0$$

```
nexo2.Vo2 = 0
nexo2.SPo2 = 0
nexo2.SPact = 0
nexo2.E = 0
nexo1.E = 0
nexo2.Enernst = 0
```

</pre>

Ecuaciones de importación:<br>

<pre>

```
Fo2 = nexo1.Fo2
Fh2og = nexo1.Fh2og
Fh2ol = nexo1.Fh2ol
Vact = nexo1.Vact
Vo2 = nexo1.Vo2
Vp = nexo1.Vp
Ve = nexo1.Ve
E0 = nexo1.Enernst
Gj1 = nexo1.Fj
Gj2 = nexo2.Fj
Fcond1 = nexo1.Fcond
Fcond2 = nexo2.Fcond
Fconv1_1 = nexo1.Fc1
Fconv1_2 = nexo2.Fc1
Fconv2_1 = nexo1.Fc2
Fconv2_2 = nexo2.Fc2
```

</pre>

</html>"),

```
Diagram,
experiment(
  StartTime=-10,
  StopTime=25,
  NumberOfIntervals=100),
experimentSetupOutput);
```

constant unidades2.constante\_gas\_ideal R = constantes.R;

parameter unidades.Pressure presion\_o2( displayUnit="Pa")=1e5;

parameter unidades.Pressure presion\_h2( displayUnit="Pa")=1e5;

parameter unidades.Pressure Ph2og( displayUnit="Pa")=40000;

parameter unidades.Pressure P0sath2o( displayUnit="Pa")=3169;

parameter unidades2.Fneto flujo\_refrigerante=5e-3;//Flujo molar de aire refrigerante,  
equivale a un octavo de litro por segundo aproximadamente

parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp\_aire=1012;//Calor específico del aire

parameter unidades.SpecificHeatCapacity Cp\_colector=897;//Calor específico del

colector de aluminio

parameter unidades2.carga\_agua K1=2.28e-2;

parameter unidades2.porosidad EPSILONg=1 "disponible para los gases";

parameter unidades.Temp\_K T=323;//temperatura refrigerante

parameter unidades.Temp\_K T0=353;//temperatura inicial

parameter unidades.Temp\_K T0sat=298.16;

parameter unidades.Mass Mh2o=18e-3;

parameter unidades.Mass Maire=28.85e-3;  
parameter unidades.Density RHOs=2000;//aluminio=2698  
parameter unidades.Length Ltot=4e-3;  
parameter unidades.Area Svc=1;

unidades2.concentracion\_molar Ch2ol;  
unidades2.Fneto Fo2;  
unidades2.Fneto Fh2;  
unidades2.Fneto Fh2og\_1;  
unidades2.Fneto Fh2og\_2;  
unidades2.Fneto Fh2ol\_1;  
unidades2.Fneto Fh2ol\_2;  
unidades2.moles Nh2ol;  
unidades.Mass Mh2ol;  
unidades.Mass Ms;  
unidades.Volume Vvc;  
unidades.Length Lvc;  
unidades.Temp\_K T1;//temperatura colector cátodo  
unidades.Temp\_K T2;//temperatura colector ánodo  
unidades.Pressure Psath2o;  
unidades2.entalpia\_molar Lv;  
unidades2.humedad\_relativa ALFA;  
unidades2.carga\_agua carga\_agua\_liquida;  
unidades.ElectricPotential Vo2;  
unidades.ElectricPotential Vh2;  
unidades.ElectricPotential Vact;  
unidades.ElectricPotential Vp;  
unidades.ElectricPotential Ve;  
unidades.ElectricPotential Vcc;  
unidades.ElectricPotential E0;  
unidades.ElectricPotential Vout;  
unidades.InstantaneousPower P;  
unidades.Efficiency rendimiento;  
unidades.ElectricCurrent Ilinea;  
unidades.ElectricCurrent Iext;  
unidades.ElectricCurrent Ie;  
unidades.EnergyFlowRate Gj1;  
unidades.EnergyFlowRate Gj2;  
unidades.EnergyFlowRate Fcond1;  
unidades.EnergyFlowRate Fcond2;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv1\_1;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv1\_2;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv2\_1;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv2\_2;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv3\_1;  
unidades.EnergyFlowRate Fconv3\_2;

equation

Mh2ol = carga\_agua\_liquida \* Ms; //-----  
Determinamos la concentración en función de la carga de agua líquida

```

Ms = Vvc*RHOs;
Vvc = Svc*Lvc;
Lvc = Ltot;
Nh2ol = Mh2ol/Mh2o;
Ch2ol = Nh2ol/Vvc;

der(T1) =
(Fconv3_1+Fcond1+Fconv1_1+Fconv2_1+Gj1)/(Cp_colector*RHOs*Svc*Lvc); //--
Evolución de la temperatura
der(T2) =
(Fconv3_2+Fcond2+Fconv1_2+Fconv2_2+Gj2)/(Cp_colector*RHOs*Svc*Lvc); //--
Evolución de la temperatura

Fconv3_1 = Cp_aire*flujo_refrigerante*Maire*(T-T1);//-----
Flujo energético refrigerante convectivo catódico
Fconv3_2 = Cp_aire*flujo_refrigerante*Maire*(T-T2);//-----
Flujo energético refrigerante convectivo anódico

Psath2o = P0sath2o*Modelica.Math.exp((T2-T0sat)*Lv/(R*T2*T0sat)); //-----
-Cálculo de propiedades del vapor de agua y su relación con la carga de agua
Lv = 3.1192e4+1.854018e2*T2-8.05959e-1*T2^2+1.379322e-3*T2^3-9.9104399e-
7*T2^4;
ALFA = Ph2og/Psath2o;
carga_agua_liquida = K1*ALFA^2;

Ilinea = if time<0 then 0 else Iext;
P = Vout*Iext;
if (Fcond1+Fcond2+P)>0 then
rendimiento = 100*P/(Fcond1+Fcond2+P);
else
rendimiento = 0;
end if;

Vcc = E0-Ve-Vp-Vact-Vo2-Vh2;
Vout = if noEvent(Vcc<=0) then 0 else Vcc;

pin_positivo1.v - pin_negativo1.v = Vout; //-----
Ecuaciones de la librería de modelica
pin_positivo1.i = -pin_negativo1.i;
-Iext = pin_positivo1.i;

nexo1.Po2 = presion_o2; //-----
Exportamos.
nexo2.Po2 = 0;
nexo2.Ph2 = presion_h2;
nexo1.Ph2 = 0;
nexo1.Ph2og = Ph2og;
nexo2.Ph2og = Ph2og;
nexo1.Psath2o = Psath2o;
nexo2.Psath2o = Psath2o;

```

```

nexo1.Ch2ol = Ch2ol;
nexo2.Ch2ol = Ch2ol;
nexo1.T = T1;
nexo2.T = T2;
nexo1.EPSILONg = EPSILONg;
nexo2.EPSILONg = EPSILONg;
nexo2.Vp = 0;
nexo1.Ilinea = Ilinea;
nexo2.Ie = 0;
nexo2.Ve = 0;
nexo2.Vact = 0;
nexo2.Vo2 = 0;
nexo2.Vh2 = 0;
nexo2.SPo2 = 0;
nexo2.SPh2 = 0;
nexo1.SPh2 = 0;
nexo1.SPo2 = 0;
nexo2.SPact = 0;
nexo1.SPact = 0;
nexo2.E = 0;
nexo1.E = 0;
nexo2.Enernst = 0;

```

Fo2 = nexo1.Fo2; //-----Importamos  
los datos importantes del cátodo

```

Fh2 = nexo2.Fh2;
Fh2og_1 = nexo1.Fh2og;
Fh2og_2 = nexo2.Fh2og;
Fh2ol_1 = nexo1.Fh2ol;
Fh2ol_2 = nexo2.Fh2ol;
Vact = nexo1.Vact;
Vo2 = nexo1.Vo2;
Vh2 = nexo1.Vh2;
Vp = nexo1.Vp;
Ve = nexo1.Ve;
E0 = nexo1.Enernst;
nexo1.Ie = Ie;
Gj1 = nexo1.Fj;
Gj2 = nexo2.Fj;
Fcond1 = nexo1.Fcond;
Fcond2 = nexo2.Fcond;
Fconv1_1 = nexo1.Fc1;
Fconv1_2 = nexo2.Fc1;
Fconv2_1 = nexo1.Fc2;
Fconv2_2 = nexo2.Fc2;

```

initial equation

```

T1 = T0;
T2 = T0;

```

end terminales;

model resistencia\_polarizacion "para analizar el encharcamiento"

```
annotation (Icon(
  Rectangle(extent=[-20,20; 20,0]),
  Line(points=[-64,10; -20,10]),
  Line(points=[20,10; 64,10])), Documentation(info="<html>
Impone 11 valores de impedancias resistivas en 11 instantes temporales
distintos.<br><br>
Está pensada para analizar la variación en las variables de la pila ante cambios en la
carga.<br>
Un ejemplo puede ser el análisis del encharcamiento.
</html>"),
  experiment(
    StartTime=-10,
    StopTime=120,
    NumberOfIntervals=1000),
  experimentSetupOutput);
pin_positivo pin_positivo1 annotation (extent=[60,0; 80,20]);
pin_negativo pin_negativo1 annotation (extent=[-80,0; -60,20]);
```

```
parameter Real r1=0.1;
parameter Real r2=0.02;
parameter Real r3=0.01;
parameter Real r4=0.005;
parameter Real r5=0.0033;
parameter Real r6=0.0025;
parameter Real r7=0.002;
parameter Real r8=0.0017;
parameter Real r9=0.0014;
parameter Real r10=0.0010;
parameter Real r11=0.0005;
Real R;
Real i(start=0);
```

equation

```
R = if time<=25 then r1 else
  if time<=50 then r2 else
    if time<=75 then r3 else
      if time<=100 then r4 else
        if time<=125 then r5 else
          if time<=150 then r6 else
            if time<=175 then r7 else
              if time<=200 then r8 else
                if time<=225 then r9 else
                  if time<=250 then r10 else
                    r11;
pin_positivo1.v-pin_negativo1.v = i*R;
pin_positivo1.i = i;
```

```
pin_negativo1.i = -i;
```

```
end resistencia_polarizacion;
```

```
model resistencia_polarizacion2 "para obtener la curva de polarizacion"
```

```
  annotation (Icon(  
    Rectangle(extent=[-20,20; 20,0]),  
    Line(points=[-64,10; -20,10]),  
    Line(points=[20,10; 64,10])), Documentation(info="<html>
```

Sirve para analizar la respuesta de las variables de la pila ante un cambio lineal de la impedancia.<br><br>

Se debe tener en cuenta que como la impedancia varía linealmente, la corriente disminuye exponencialmente.<br>

En definitiva, con este modelo no se obtiene la curva V-I de polarización, sino la R-I.</html>");

```
  pin_positivo pin_positivo1 annotation (extent=[60,0; 80,20]);  
  pin_negativo pin_negativo1 annotation (extent=[-80,0; -60,20]);
```

```
parameter Modelica.SIunits.Resistance R_ini=1;  
Modelica.SIunits.ElectricCurrent i;  
Modelica.SIunits.Resistance R;
```

```
equation
```

```
der(R)=if R>0.001 and time>0 then -0.001 else 0;
```

```
pin_positivo1.v-pin_negativo1.v = i*R;
```

```
pin_positivo1.i = i;
```

```
pin_negativo1.i = -i;
```

```
initial equation
```

```
R = R_ini;
```

```
end resistencia_polarizacion2;
```

```
model resistencia_polarizacion3 "para analizar el encharcamiento"
```

```
  annotation (Icon(  
    Rectangle(extent=[-20,20; 20,0]),  
    Line(points=[-64,10; -20,10]),  
    Line(points=[20,10; 64,10])), Documentation(info="<html>
```

Impone 11 valores de impedancias resistivas en 11 instantes temporales distintos.<br><br>

Está pensada para analizar la variación en las variables de la pila ante cambios en la carga.<br>

Un ejemplo puede ser el análisis del encharcamiento.

```
</html>"),
```

```
  experiment(  
    StartTime=-10,  
    StopTime=120,  
    NumberOfIntervals=1000),
```

```

    experimentSetupOutput);
pin_positivo pin_positivo1 annotation (extent=[60,0; 80,20]);
pin_negativo pin_negativo1 annotation (extent=[-80,0; -60,20]);

parameter Real r1=0.1;
parameter Real r2=0.02;
parameter Real r3=0.01;
parameter Real r4=0.005;
parameter Real r5=0.0033;
parameter Real r6=0.0025;
parameter Real r7=0.002;
parameter Real r8=0.0017;
parameter Real r9=0.0014;
parameter Real r10=0.0010;
parameter Real r11=0.0005;
Real R;
Real i(start=0);

equation
R = if time<=100 then r1 else
    if time<=200 then r2 else
    if time<=300 then r3 else
    if time<=400 then r4 else
    if time<=500 then r5 else
    if time<=600 then r6 else
    if time<=700 then r7 else
    if time<=800 then r8 else
    if time<=900 then r9 else
    if time<=1000 then r10 else
    r11;
pin_positivo1.v-pin_negativo1.v = i*R;
pin_positivo1.i = i;
pin_negativo1.i = -i;

end resistencia_polarizacion3;

model corriente_polarizacion "para obtener la curva de polarizacion"

    annotation (Icon(
        Rectangle(extent=[-20,20; 20,0]),
        Line(points=[-64,10; -20,10]),
        Line(points=[20,10; 64,10])), Documentation(info="<html>
En este modelo se varía la intensidad que circula a su través, de una forma
lineal.<br><br>
Este es el adecuado para obtener una curva V-I
</html>"));
    pin_positivo pin_positivo1 annotation (extent=[60,0; 80,20]);
    pin_negativo pin_negativo1 annotation (extent=[-80,0; -60,20]);

Real R;

```

```
Real i(start=1e-10, fixed=true);
```

```
equation
```

```
der(i)=if i<800 and time>0 then 1 else 0;
```

```
pin_positivo1.v-pin_negativo1.v = i*R;
```

```
pin_positivo1.i = i;
```

```
pin_negativo1.i = -i;
```

```
end corriente_polarizacion;
```

```
model corriente_polarizacion2 "para obtener la curva de polarizacion"
```

```
annotation (Icon(
```

```
  Rectangle(extent=[-20,20; 20,0]),
```

```
  Line(points=[-64,10; -20,10]),
```

```
  Line(points=[20,10; 64,10])), Documentation(info="<html>
```

```
En este modelo se varía la intensidad que circula a su través, de una forma lineal.<br><br>
```

```
Este es el adecuado para obtener una curva V-I
```

```
</html>"));
```

```
  pin_positivo pin_positivo1 annotation (extent=[60,0; 80,20]);
```

```
  pin_negativo pin_negativo1 annotation (extent=[-80,0; -60,20]);
```

```
Real R;
```

```
Real i(start=1e-10, fixed=true);
```

```
equation
```

```
der(i)=if i<800 and time>0 then 0.1 else 0;
```

```
pin_positivo1.v-pin_negativo1.v = i*R;
```

```
pin_positivo1.i = i;
```

```
pin_negativo1.i = -i;
```

```
end corriente_polarizacion2;
```

```
end piezas;
```

```
package modelos_compuestos
```

```
model ejemplo_capa_catalitica "Modelo gráfico, ejemplo de la capa catalítica"
```

```
annotation (Diagram,
```

```
  experiment(StopTime=2000),
```

```
  experimentSetupOutput,
```

```
  Icon(
```

```
    Rectangle(extent=[-60,-80; 60,80], style(
```

```
      color=0,
```

```
      rgbcolor={0,0,0},
```

```
      fillColor=30,
```

```
      rgbfillColor={215,215,215})),
```

```
    Rectangle(extent=[-80,-2; -60,2], style(
```

```
      color=0,
```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Rectangle(extent=[60,-2; 80,2], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-20,-80; -20,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[20,-80; 20,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1))),

```

Documentation(info="<html>

Este modelo es una muestra de cómo se debe montar la capa catalítica.  
</html>");

```

piezas.nexo nexo_menos
    annotation (extent=[-106,-16; -74,16]);
piezas.nexo nexo_mas
    annotation (extent=[74,-16; 106,16]);
piezas.VC_catalitica v1
    annotation (extent=[-58,60; -38,80]);
piezas.VC_catalitica v2

```

annotation (extent=[-28,60; -8,80]);  
piezas.VC\_catalitica v3  
annotation (extent=[2,60; 22,80]);  
piezas.VC\_catalitica v4  
annotation (extent=[32,60; 52,80]);  
piezas.VC\_catalitica v5  
annotation (extent=[62,60; 82,80]);  
piezas.VC\_catalitica v6  
annotation (extent=[-58,20; -38,40]);  
piezas.VC\_catalitica v7  
annotation (extent=[-28,20; -8,40]);  
piezas.VC\_catalitica v8  
annotation (extent=[2,20; 22,40]);  
piezas.VC\_catalitica v9  
annotation (extent=[32,20; 52,40]);  
piezas.VC\_catalitica v10  
annotation (extent=[62,20; 82,40]);  
piezas.VC\_catalitica v11  
annotation (extent=[-58,-20; -38,0]);  
piezas.VC\_catalitica v12  
annotation (extent=[-28,-20; -8,0]);  
piezas.VC\_catalitica v13  
annotation (extent=[2,-20; 22,0]);  
piezas.VC\_catalitica v14  
annotation (extent=[32,-20; 52,0]);  
piezas.VC\_catalitica v15  
annotation (extent=[62,-20; 82,0]);  
piezas.VC\_catalitica v16  
annotation (extent=[-58,-60; -38,-40]);  
piezas.VC\_catalitica v17  
annotation (extent=[-28,-60; -8,-40]);  
piezas.VC\_catalitica v18  
annotation (extent=[2,-60; 22,-40]);  
piezas.VC\_catalitica v19  
annotation (extent=[32,-60; 52,-40]);  
piezas.VC\_catalitica v20  
annotation (extent=[62,-60; 82,-40]);  
piezas.TD\_catalitica d1  
annotation (extent=[-42,40; -22,60]);  
piezas.TD\_catalitica d2  
annotation (extent=[-14,40; 6,60]);  
piezas.TD\_catalitica d3  
annotation (extent=[18,40; 38,60]);  
piezas.TD\_catalitica d4  
annotation (extent=[46,40; 66,60]);  
piezas.TD\_catalitica d5  
annotation (extent=[-74,0; -54,20]);  
piezas.TD\_catalitica d6  
annotation (extent=[-42,0; -22,20]);  
piezas.TD\_catalitica d7

```

    annotation (extent=[-14,0; 6,20]);
piezas.TD_catalitica d8
    annotation (extent=[18,0; 38,20]);
piezas.TD_catalitica d9
    annotation (extent=[46,0; 66,20]);
piezas.TD_catalitica d10
    annotation (extent=[-74,-40; -54,-20]);
piezas.TD_catalitica d11
    annotation (extent=[-42,-40; -22,-20]);
piezas.TD_catalitica d12
    annotation (extent=[-14,-40; 6,-20]);
piezas.TD_catalitica d13
    annotation (extent=[18,-40; 38,-20]);
piezas.TD_catalitica d14
    annotation (extent=[46,-40; 66,-20]);
piezas.TD_catalitica d15
    annotation (extent=[-74,-80; -54,-60]);
piezas.TD_catalitica d16
    annotation (extent=[-42,-80; -22,-60]);
piezas.TD_catalitica d17
    annotation (extent=[-14,-80; 6,-60]);
piezas.TD_catalitica d18
    annotation (extent=[18,-80; 38,-60]);
piezas.TD_catalitica d19
    annotation (extent=[46,-80; 66,-60]);
piezas.TD_catalitica d20
    annotation (extent=[78,-80; 98,-60]);
annotation (Diagram);

```

equation

```

connect(nexo_menos, v1.nexo1) annotation (points=[-90,0; -90,62; -48,62],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v1.nexo1, d1.nexo1) annotation (points=[-48,62; -48,50; -40,50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d1.nexo2, v2.nexo1) annotation (points=[-24,50; -18,50; -18,62],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v2.nexo1, d2.nexo1) annotation (points=[-18,62; -18,50; -12,50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo2, v3.nexo1) annotation (points=[4,50; 12,50; 12,62],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v3.nexo1, d3.nexo1) annotation (points=[12,62; 12,50; 20,50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo2, v4.nexo1) annotation (points=[36,50; 42,50; 42,62],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v4.nexo1, d4.nexo1) annotation (points=[42,62; 42,50; 48,50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo2, v5.nexo1) annotation (points=[64,50; 72,50; 72,62],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v5.nexo1, d5.nexo1) annotation (points=[72,62; 72,40; -72,40; -72,
    10], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));

```

```
connect(d5.nexo2, v6.nexo1) annotation (points=[-56,10; -48,10; -48,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v6.nexo1, d6.nexo1) annotation (points=[-48,22; -48,10; -40,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo2, v7.nexo1) annotation (points=[-24,10; -18,10; -18,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v7.nexo1, d7.nexo1) annotation (points=[-18,22; -18,10; -12,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo2, v8.nexo1) annotation (points=[4,10; 12,10; 12,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v8.nexo1, d8.nexo1) annotation (points=[12,22; 12,10; 20,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo2, v9.nexo1) annotation (points=[36,10; 42,10; 42,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v9.nexo1, d9.nexo1) annotation (points=[42,22; 42,10; 48,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo2, v10.nexo1) annotation (points=[64,10; 72,10; 72,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v10.nexo1, d10.nexo1) annotation (points=[72,22; 72,0; -72,0; -72,
-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo2, v11.nexo1) annotation (points=[-56,-30; -48,-30; -48,
-18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v11.nexo1, d11.nexo1) annotation (points=[-48,-18; -48,-30; -40,
-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo2, v12.nexo1) annotation (points=[-24,-30; -18,-30; -18,
-18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v12.nexo1, d12.nexo1) annotation (points=[-18,-18; -18,-30; -12,
-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo2, v13.nexo1) annotation (points=[4,-30; 12,-30; 12,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v13.nexo1, d13.nexo1) annotation (points=[12,-18; 12,-30; 20,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo2, v14.nexo1) annotation (points=[36,-30; 42,-30; 42,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v14.nexo1, d14.nexo1) annotation (points=[42,-18; 42,-30; 48,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo2, v15.nexo1) annotation (points=[64,-30; 72,-30; 72,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v15.nexo1, d15.nexo1) annotation (points=[72,-18; 72,-40; -72,-40;
-72,-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo2, v16.nexo1) annotation (points=[-56,-70; -48,-70; -48,
-58], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v16.nexo1, d16.nexo1) annotation (points=[-48,-58; -48,-70; -40,
-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo2, v17.nexo1) annotation (points=[-24,-70; -18,-70; -18,
-58], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v17.nexo1, d17.nexo1) annotation (points=[-18,-58; -18,-70; -12,
-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo2, v18.nexo1) annotation (points=[4,-70; 12,-70; 12,-58],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```

connect(v18.nexo1, d18.nexo1) annotation (points=[12,-58; 12,-70; 20,-70],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo2, v19.nexo1) annotation (points=[36,-70; 42,-70; 42,-58],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v19.nexo1, d19.nexo1) annotation (points=[42,-58; 42,-70; 48,-70],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo2, v20.nexo1) annotation (points=[64,-70; 72,-70; 72,-58],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v20.nexo1, d20.nexo1) annotation (points=[72,-58; 72,-70; 80,-70],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d20.nexo2, nexo_mas) annotation (points=[96,-70; 96,-34; 90,-34;
  90,0], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
end ejemplo_capa_catalitica;

```

model ejemplo\_membrana "Modelo gráfico, ejemplo de la capa membrana"

```

annotation (Diagram,
  experiment(StopTime=2000),
  experimentSetupOutput,
  Icon(
    Rectangle(extent=[-60,-80; 60,80], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-80,-2; -60,2], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=0,
      rgbfillColor={0,0,0},
      fillPattern=1)),
    Rectangle(extent=[60,-2; 80,2], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=0,
      rgbfillColor={0,0,0},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,80], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=0,
      rgbfillColor={0,0,0},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[-20,-80; -20,80], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=0,
      rgbfillColor={0,0,0},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[0,-80; 0,80], style(

```

```

        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[20,-80; 20,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[40,-80; 40,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1))),
    Documentation(info="<html>
Este modelo es una muestra de cómo se debe montar la membrana.
</html>"));
    piezas.nexo nexo_menos
        annotation (extent=[-106,-16; -74,16]);
    piezas.nexo nexo_mas
        annotation (extent=[74,-16; 106,16]);
    piezas.VC_membrana v1
        annotation (extent=[-58,60; -38,80]);
    piezas.VC_membrana v2
        annotation (extent=[-28,60; -8,80]);
    piezas.VC_membrana v3
        annotation (extent=[2,60; 22,80]);
    piezas.VC_membrana v4
        annotation (extent=[32,60; 52,80]);
    piezas.VC_membrana v5
        annotation (extent=[62,60; 82,80]);
    piezas.VC_membrana v6
        annotation (extent=[-58,20; -38,40]);
    piezas.VC_membrana v7
        annotation (extent=[-28,20; -8,40]);
    piezas.VC_membrana v8
        annotation (extent=[2,20; 22,40]);
    piezas.VC_membrana v9
        annotation (extent=[32,20; 52,40]);
    piezas.VC_membrana v10
        annotation (extent=[62,20; 82,40]);
    piezas.VC_membrana v11
        annotation (extent=[-58,-20; -38,0]);
    piezas.VC_membrana v12
        annotation (extent=[-28,-20; -8,0]);
    piezas.VC_membrana v13
        annotation (extent=[2,-20; 22,0]);

```

piezas.VC\_membrana v14  
annotation (extent=[32,-20; 52,0]);  
piezas.VC\_membrana v15  
annotation (extent=[62,-20; 82,0]);  
piezas.VC\_membrana v16  
annotation (extent=[-58,-60; -38,-40]);  
piezas.VC\_membrana v17  
annotation (extent=[-28,-60; -8,-40]);  
piezas.VC\_membrana v18  
annotation (extent=[2,-60; 22,-40]);  
piezas.VC\_membrana v19  
annotation (extent=[32,-60; 52,-40]);  
piezas.VC\_membrana v20  
annotation (extent=[62,-60; 82,-40]);  
piezas.TD\_membrana d1  
annotation (extent=[-42,40; -22,60]);  
piezas.TD\_membrana d2  
annotation (extent=[-14,40; 6,60]);  
piezas.TD\_membrana d3  
annotation (extent=[18,40; 38,60]);  
piezas.TD\_membrana d4  
annotation (extent=[46,40; 66,60]);  
piezas.TD\_membrana d5  
annotation (extent=[-74,0; -54,20]);  
piezas.TD\_membrana d6  
annotation (extent=[-42,0; -22,20]);  
piezas.TD\_membrana d7  
annotation (extent=[-14,0; 6,20]);  
piezas.TD\_membrana d8  
annotation (extent=[18,0; 38,20]);  
piezas.TD\_membrana d9  
annotation (extent=[46,0; 66,20]);  
piezas.TD\_membrana d10  
annotation (extent=[-74,-40; -54,-20]);  
piezas.TD\_membrana d11  
annotation (extent=[-42,-40; -22,-20]);  
piezas.TD\_membrana d12  
annotation (extent=[-14,-40; 6,-20]);  
piezas.TD\_membrana d13  
annotation (extent=[18,-40; 38,-20]);  
piezas.TD\_membrana d14  
annotation (extent=[46,-40; 66,-20]);  
piezas.TD\_membrana d15  
annotation (extent=[-74,-80; -54,-60]);  
piezas.TD\_membrana d16  
annotation (extent=[-42,-80; -22,-60]);  
piezas.TD\_membrana d17  
annotation (extent=[-14,-80; 6,-60]);  
piezas.TD\_membrana d18  
annotation (extent=[18,-80; 38,-60]);

```
piezas.TD_membrana d19
  annotation (extent=[48,-80; 68,-60]);
piezas.TD_membrana d20 annotation (extent=[76,-80; 96,-60]);
annotation (Diagram);
```

equation

```
connect(v1.nexo1,d1.nexo1) annotation (points=[-48,62; -48,50; -40,50],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d1.nexo2, v2.nexo1) annotation (points=[-24,50; -18,50; -18,62],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo1, v2.nexo1) annotation (points=[-12,50; -18,50; -18,62],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo2, v3.nexo1)
  annotation (points=[4,50; 12,50; 12,62],style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v3.nexo1,d3.nexo1)
  annotation (points=[12,62; 12,50; 20,50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo2, v4.nexo1) annotation (points=[36,50; 42,50; 42,62], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v4.nexo1,d4.nexo1) annotation (points=[42,62; 42,50; 48,50], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo2, v5.nexo1) annotation (points=[64,50; 72,50; 72,62], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v5.nexo1,d5.nexo1) annotation (points=[72,62; 72,40; -78,40; -78,10;
  -72,10], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo2, v6.nexo1) annotation (points=[-56,10; -48,10; -48,22],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v6.nexo1,d6.nexo1) annotation (points=[-48,22; -48,10; -40,10],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo2, v7.nexo1) annotation (points=[-24,10; -18,10; -18,22],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v7.nexo1,d7.nexo1) annotation (points=[-18,22; -18,10; -12,10],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo2, v8.nexo1)
  annotation (points=[4,10; 12,10; 12,22],style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v8.nexo1,d8.nexo1)
  annotation (points=[12,22; 12,10; 20,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo2, v9.nexo1) annotation (points=[36,10; 42,10; 42,22], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v9.nexo1, d9.nexo1)
  annotation (points=[42,22; 42,10; 48,10], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo2, v10.nexo1)
  annotation (points=[64,10; 72,10; 72,22], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v10.nexo1,d10.nexo1) annotation (points=[72,22; 72,0; -78,0; -78,-30;
  -72,-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo2, v11.nexo1) annotation (points=[-56,-30; -48,-30; -48,-18],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```

connect(v11.nexo1,d11. nexo1) annotation (points=[-48,-18; -48,-30; -40,-30],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo2, v12.nexo1) annotation (points=[-24,-30; -18,-30; -18,-18],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v12.nexo1,d12. nexo1) annotation (points=[-18,-18; -18,-30; -12,-30],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo2, v13.nexo1) annotation (points=[4,-30; 12,-30; 12,-18],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v13.nexo1,d13. nexo1) annotation (points=[12,-18; 12,-30; 20,-30],
style(
color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo2, v14.nexo1) annotation (points=[36,-30; 42,-30; 42,-18],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v14.nexo1,d14. nexo1) annotation (points=[42,-18; 42,-30; 48,-30],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo2, v15.nexo1) annotation (points=[64,-30; 72,-30; 72,-18],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v15.nexo1,d15. nexo1) annotation (points=[72,-18; 72,-40; -78,-40;
-78,-70; -72,-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo2, v16.nexo1) annotation (points=[-56,-70; -48,-70; -48,-58],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v16.nexo1,d16. nexo1) annotation (points=[-48,-58; -48,-70; -40,-70],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo2, v17.nexo1) annotation (points=[-24,-70; -18,-70; -18,-58],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v17.nexo1,d17. nexo1) annotation (points=[-18,-58; -18,-70; -12,-70],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo2, v18.nexo1) annotation (points=[4,-70; 12,-70; 12,-58],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v18.nexo1,d18. nexo1) annotation (points=[12,-58; 12,-70; 20,-70],
style(
color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo2, v19.nexo1) annotation (points=[36,-70; 42,-70; 42,-58],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v19.nexo1,d19. nexo1) annotation (points=[42,-58; 42,-70; 50,-70],
style(
color=0,
rgbcolor={0,0,0},
fillColor=68,
rgbfillColor={170,213,255},
fillPattern=1));
connect(d19.nexo2, v20.nexo1) annotation (points=[66,-70; 72,-70; 72,-58],
style(
color=0,
rgbcolor={0,0,0},
fillColor=68,
rgbfillColor={170,213,255},
fillPattern=1));
connect(v20.nexo1,d20. nexo1) annotation (points=[72,-58; 72,-70; 78,
-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));

```

```

connect(d20.nexo2, nexo_mas)    annotation (points=[94,-70; 94,-56; 90,
-56; 90,0], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v1.nexo1, nexo_menos) annotation (points=[-48,62; -48,50; -90,50;
-90,0], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
end ejemplo_membrana;

```

model ejemplo\_capa\_anodica "Ejemplo de conexión de un ánodo"

```

piezas.nexo nexo_menos
    annotation (extent=[-106,-16; -74,16]);

```

```

piezas.nexo nexo_mas
    annotation (extent=[74,-16; 106,16]);

```

```

annotation (Icon(
    Rectangle(extent=[-60,-80; 60,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[-80,-2; -60,2], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Rectangle(extent=[60,-2; 80,2], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[-20,-80; -20,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[0,-80; 0,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[20,-80; 20,80], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},

```

```

fillColor=0,
rgbfillColor={0,0,0},
fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,80], style(
color=0,
rgbcolor={0,0,0},
fillColor=0,
rgbfillColor={0,0,0},
fillPattern=1))), Diagram);
piezas.VC_anodica v1 annotation (extent=[-58,60; -38,80]);
piezas.VC_anodica v2 annotation (extent=[-28,60; -8,80]);
piezas.VC_anodica v3 annotation (extent=[2,60; 22,80]);
piezas.VC_anodica v4 annotation (extent=[32,60; 52,80]);
piezas.VC_anodica v5 annotation (extent=[62,60; 82,80]);
piezas.VC_anodica v6 annotation (extent=[-58,20; -38,40]);
piezas.VC_anodica v7 annotation (extent=[-28,20; -8,40]);
piezas.VC_anodica v8 annotation (extent=[2,20; 22,40]);
piezas.VC_anodica v9 annotation (extent=[32,20; 52,40]);
piezas.VC_anodica v10 annotation (extent=[62,20; 82,40]);
piezas.VC_anodica v11 annotation (extent=[-58,-20; -38,0]);
piezas.VC_anodica v12 annotation (extent=[-28,-20; -8,0]);
piezas.VC_anodica v13 annotation (extent=[2,-20; 22,0]);
piezas.VC_anodica v14 annotation (extent=[32,-20; 52,0]);
piezas.VC_anodica v15 annotation (extent=[62,-20; 82,0]);
piezas.VC_anodica v16 annotation (extent=[-58,-60; -38,-40]);
piezas.VC_anodica v17 annotation (extent=[-28,-60; -8,-40]);
piezas.VC_anodica v18 annotation (extent=[2,-60; 22,-40]);
piezas.VC_anodica v19 annotation (extent=[32,-60; 52,-40]);
piezas.VC_anodica v20 annotation (extent=[62,-60; 82,-40]);
piezas.TD_anodica d1 annotation (extent=[-42,40; -22,60]);
piezas.TD_anodica d2 annotation (extent=[-12,40; 8,60]);
piezas.TD_anodica d3 annotation (extent=[16,40; 36,60]);
piezas.TD_anodica d4 annotation (extent=[48,40; 68,60]);
piezas.TD_anodica d5 annotation (extent=[-74,0; -54,20]);
piezas.TD_anodica d6 annotation (extent=[-42,0; -22,20]);
piezas.TD_anodica d7 annotation (extent=[-12,0; 8,20]);
piezas.TD_anodica d8 annotation (extent=[16,0; 36,20]);
piezas.TD_anodica d9 annotation (extent=[48,0; 68,20]);
piezas.TD_anodica d10 annotation (extent=[-74,-40; -54,-20]);
piezas.TD_anodica d11 annotation (extent=[-42,-40; -22,-20]);
piezas.TD_anodica d12 annotation (extent=[-12,-40; 8,-20]);
piezas.TD_anodica d13 annotation (extent=[16,-40; 36,-20]);
piezas.TD_anodica d14 annotation (extent=[48,-40; 68,-20]);
piezas.TD_anodica d15 annotation (extent=[-74,-80; -54,-60]);
piezas.TD_anodica d16 annotation (extent=[-42,-80; -22,-60]);
piezas.TD_anodica d17 annotation (extent=[-12,-80; 8,-60]);
piezas.TD_anodica d18 annotation (extent=[16,-80; 36,-60]);
piezas.TD_anodica d19 annotation (extent=[48,-80; 68,-60]);
piezas.TD_anodica d20 annotation (extent=[78,-80; 98,-60]);
equation

```

```

connect(nexo_menos, v1.nexo1) annotation (points=[-90,0; -90,62; -48,62],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v1.nexo1, d1.nexo1) annotation (points=[-48,62; -48,50; -40,50],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d1.nexo2, v2.nexo1) annotation (points=[-24,50; -18,50; -18,62],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v2.nexo1, d2.nexo1) annotation (points=[-18,62; -18,50; -10,50],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo2, v3.nexo1) annotation (points=[6,50; 12,50; 12,62],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v3.nexo1, d3.nexo1) annotation (points=[12,62; 12,50; 18,50],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo2, v4.nexo1) annotation (points=[34,50; 42,50; 42,62],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v4.nexo1, d4.nexo1) annotation (points=[42,62; 42,50; 50,50],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo2, v5.nexo1) annotation (points=[66,50; 72,50; 72,62],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v5.nexo1, d5.nexo1) annotation (points=[72,62; 72,40; -72,40; -72,
10], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo2, v6.nexo1) annotation (points=[-56,10; -48,10; -48,22],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v6.nexo1, d6.nexo1) annotation (points=[-48,22; -48,10; -40,10],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo2, v7.nexo1) annotation (points=[-24,10; -18,10; -18,22],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v7.nexo1, d7.nexo1) annotation (points=[-18,22; -18,10; -10,10],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo2, v8.nexo1) annotation (points=[6,10; 12,10; 12,22],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v8.nexo1, d8.nexo1) annotation (points=[12,22; 12,10; 18,10],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo2, v9.nexo1) annotation (points=[34,10; 42,10; 42,22],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v9.nexo1, d9.nexo1) annotation (points=[42,22; 42,10; 50,10],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo2, v10.nexo1) annotation (points=[66,10; 72,10; 72,22],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v10.nexo1, d10.nexo1) annotation (points=[72,22; 72,0; -72,0; -72,
-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo2, v11.nexo1) annotation (points=[-56,-30; -48,-30; -48,
-18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v11.nexo1, d11.nexo1) annotation (points=[-48,-18; -48,-30; -40,
-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo2, v12.nexo1) annotation (points=[-24,-30; -18,-30; -18,
-18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v12.nexo1, d12.nexo1) annotation (points=[-18,-18; -18,-30; -10,
-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo2, v13.nexo1) annotation (points=[6,-30; 12,-30; 12,-18],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));

```

```

connect(v13.nexo1, d13.nexo1) annotation (points=[12,-18; 12,-30; 18,-30],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo2, v14.nexo1) annotation (points=[34,-30; 42,-30; 42,-18],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v14.nexo1, d14.nexo1) annotation (points=[42,-18; 42,-30; 50,-30],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo2, v15.nexo1) annotation (points=[66,-30; 72,-30; 72,-18],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v15.nexo1, d15.nexo1) annotation (points=[72,-18; 72,-40; -72,-40;
  -72,-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo2, v16.nexo1) annotation (points=[-56,-70; -48,-70; -48,
  -58], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v16.nexo1, d16.nexo1) annotation (points=[-48,-58; -48,-70; -40,
  -70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo2, v17.nexo1) annotation (points=[-24,-70; -18,-70; -18,
  -58], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v17.nexo1, d17.nexo1) annotation (points=[-18,-58; -18,-70; -10,
  -70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo2, v18.nexo1) annotation (points=[6,-70; 12,-70; 12,-58],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v18.nexo1, d18.nexo1) annotation (points=[12,-58; 12,-70; 18,-70],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo2, v19.nexo1) annotation (points=[34,-70; 42,-70; 42,-58],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v19.nexo1, d19.nexo1) annotation (points=[42,-58; 42,-70; 50,-70],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo2, v20.nexo1) annotation (points=[66,-70; 72,-70; 72,-58],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v20.nexo1, d20.nexo1) annotation (points=[72,-58; 72,-70; 80,-70],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d20.nexo2, nexo_mas) annotation (points=[96,-70; 96,-52; 90,-52;
  90,0], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
end ejemplo_capa_anodica;

```

model ejemplo\_difusora\_catodica

"Modelo gráfico, ejemplo de la capa difusora del cátodo"

```

annotation (Diagram,
  experiment(StopTime=2000),
  experimentSetupOutput,
  Icon(
    Rectangle(extent=[-60,-80; 60,80], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170})),
    Rectangle(extent=[-80,-2; -60,2], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=0,

```

```

        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1)),
Rectangle(extent=[60,-2; 80,2], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-20,-80; -20,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[20,-80; 20,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,80], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=0,
    rgbfillColor={0,0,0},
    fillPattern=1))),
Documentation(info="<html>
Este modelo es una muestra de cómo se debe montar la capa difusora.
</html>"));
piezas.nexo nexo_menos
    annotation (extent=[-106,-16; -74,16]);
piezas.nexo nexo_mas
    annotation (extent=[74,-16; 106,16]);
piezas.VC_difusora v1
    annotation (extent=[-58,60; -38,80]);
piezas.VC_difusora v2
    annotation (extent=[-28,60; -8,80]);
piezas.VC_difusora v3

```

annotation (extent=[2,60; 22,80]);  
piezas.VC\_difusora v4  
annotation (extent=[32,60; 52,80]);  
piezas.VC\_difusora v5  
annotation (extent=[62,60; 82,80]);  
piezas.VC\_difusora v6  
annotation (extent=[-58,20; -38,40]);  
piezas.VC\_difusora v7  
annotation (extent=[-28,20; -8,40]);  
piezas.VC\_difusora v8  
annotation (extent=[2,20; 22,40]);  
piezas.VC\_difusora v9  
annotation (extent=[32,20; 52,40]);  
piezas.VC\_difusora v10  
annotation (extent=[62,20; 82,40]);  
piezas.VC\_difusora v11  
annotation (extent=[-58,-20; -38,0]);  
piezas.VC\_difusora v12  
annotation (extent=[-28,-20; -8,0]);  
piezas.VC\_difusora v13  
annotation (extent=[2,-20; 22,0]);  
piezas.VC\_difusora v14  
annotation (extent=[32,-20; 52,0]);  
piezas.VC\_difusora v15  
annotation (extent=[62,-20; 82,0]);  
piezas.VC\_difusora v16  
annotation (extent=[-58,-60; -38,-40]);  
piezas.VC\_difusora v17  
annotation (extent=[-28,-60; -8,-40]);  
piezas.VC\_difusora v18  
annotation (extent=[2,-60; 22,-40]);  
piezas.VC\_difusora v19  
annotation (extent=[32,-60; 52,-40]);  
piezas.VC\_difusora v20  
annotation (extent=[62,-60; 82,-40]);  
piezas.TD\_difusora d1  
annotation (extent=[-44,40; -24,60]);  
piezas.TD\_difusora d3  
annotation (extent=[-14,40; 6,60]);  
piezas.TD\_difusora d4  
annotation (extent=[18,40; 38,60]);  
piezas.TD\_difusora d5  
annotation (extent=[46,40; 66,60]);  
piezas.TD\_difusora d6  
annotation (extent=[-74,0; -54,20]);  
piezas.TD\_difusora d7  
annotation (extent=[-42,0; -22,20]);  
piezas.TD\_difusora d8  
annotation (extent=[-14,0; 6,20]);  
piezas.TD\_difusora d9

```

    annotation (extent=[18,0; 38,20]);
piezas.TD_difusora d10
    annotation (extent=[46,0; 66,20]);
piezas.TD_difusora d11
    annotation (extent=[-74,-40; -54,-20]);
piezas.TD_difusora d12
    annotation (extent=[-42,-40; -22,-20]);
piezas.TD_difusora d13
    annotation (extent=[-14,-40; 6,-20]);
piezas.TD_difusora d14
    annotation (extent=[18,-40; 38,-20]);
piezas.TD_difusora d15
    annotation (extent=[46,-40; 66,-20]);
piezas.TD_difusora d16
    annotation (extent=[-74,-80; -54,-60]);
piezas.TD_difusora d17
    annotation (extent=[-42,-80; -22,-60]);
piezas.TD_difusora d18
    annotation (extent=[-14,-80; 6,-60]);
piezas.TD_difusora d19
    annotation (extent=[18,-80; 38,-60]);
piezas.TD_difusora d20
    annotation (extent=[46,-80; 66,-60]);
piezas.TD_difusora d21(NUMvc=40)
    annotation (extent=[76,-80; 96,-60]);
    annotation (Diagram);

```

equation

```

connect(v1.nexo1, d1.nexo1) annotation (points=[-48,62; -48,50; -42,50],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1));
connect(d1.nexo2, v2.nexo1) annotation (points=[-26,50; -18,50; -18,62],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1));
connect(d3.nexo1, v2.nexo1) annotation (points=[-12,50; -18,50; -18,62],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo2, v3.nexo1)
    annotation (points=[4,50; 12,50; 12,62],style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v3.nexo1, d4.nexo1)
    annotation (points=[12,62; 12,50; 20,50],
        style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo2, v4.nexo1) annotation (points=[36,50; 42,50; 42,62], style(

```

```

    color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v4.nexo1, d5.nexo1) annotation (points=[42,62; 42,50; 48,50], style(
    color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo2, v5.nexo1) annotation (points=[64,50; 72,50; 72,62], style(
    color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v5.nexo1, d6.nexo1) annotation (points=[72,62; 72,40; -78,40; -78,10;
    -72,10], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo2, v6.nexo1) annotation (points=[-56,10; -48,10; -48,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v6.nexo1, d7.nexo1) annotation (points=[-48,22; -48,10; -40,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo2, v7.nexo1) annotation (points=[-24,10; -18,10; -18,22],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v7.nexo1, d8.nexo1) annotation (points=[-18,22; -18,10; -12,10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo2, v8.nexo1)
    annotation (points=[4,10; 12,10; 12,22],style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v8.nexo1, d9.nexo1)
    annotation (points=[12,22; 12,10; 20,10],
                style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo2, v9.nexo1) annotation (points=[36,10; 42,10; 42,22], style(
    color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v9.nexo1, d10.nexo1) annotation (points=[42,22; 42,10; 48,10], style(
    color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo2, v10.nexo1) annotation (points=[64,10; 72,10; 72,22], style(
    color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v10.nexo1, d11.nexo1) annotation (points=[72,22; 72,0; -78,0; -78,-30;
    -72,-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo2, v11.nexo1) annotation (points=[-56,-30; -48,-30; -48,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v11.nexo1, d12.nexo1) annotation (points=[-48,-18; -48,-30; -40,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo2, v12.nexo1) annotation (points=[-24,-30; -18,-30; -18,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v12.nexo1, d13.nexo1) annotation (points=[-18,-18; -18,-30; -12,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo2, v13.nexo1) annotation (points=[4,-30; 12,-30; 12,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v13.nexo1, d14.nexo1) annotation (points=[12,-18; 12,-30; 20,-30],
    style(
        color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo2, v14.nexo1) annotation (points=[36,-30; 42,-30; 42,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v14.nexo1, d15.nexo1) annotation (points=[42,-18; 42,-30; 48,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo2, v15.nexo1) annotation (points=[64,-30; 72,-30; 72,-18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v15.nexo1, d16.nexo1) annotation (points=[72,-18; 72,-40; -78,-40;
    -78,-70; -72,-70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo2, v16.nexo1) annotation (points=[-56,-70; -48,-70; -48,-58],

```

```

    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v16.nexo1, d17.nexo1) annotation (points=[-48,-58; -48,-70; -40,-70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo2, v17.nexo1) annotation (points=[-24,-70; -18,-70; -18,-58],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v17.nexo1, d18.nexo1) annotation (points=[-18,-58; -18,-70; -12,-70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo2, v18.nexo1) annotation (points=[4,-70; 12,-70; 12,-58],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v18.nexo1, d19.nexo1) annotation (points=[12,-58; 12,-70; 20,-70],
    style(
        color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo2, v19.nexo1) annotation (points=[36,-70; 42,-70; 42,-58],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v19.nexo1, d20.nexo1) annotation (points=[42,-58; 42,-70; 48,-70],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1));
connect(d20.nexo2, v20.nexo1) annotation (points=[64,-70; 72,-70; 72,-58],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1));
connect(v20.nexo1, d21.nexo1) annotation (points=[72,-58; 72,-70; 78,-70],
    style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170},
        fillPattern=1));
connect(d21.nexo2, nexo_mas) annotation (points=[94,-70; 94,-40; 90,-40;
    90,0], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170},
    fillPattern=1));
connect(v1.nexo1, nexo_menos) annotation (points=[-48,62; -90,62; -90,0],
    style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170},
    fillPattern=1));
end ejemplo_difusora_catodica;

```

model ejemplo\_difusora\_anodica

"Modelo gráfico, ejemplo de la capa difusora del ánodo"

```
annotation (Diagram,  
  experiment(StopTime=2000),  
  experimentSetupOutput,  
  Icon(  
    Rectangle(extent=[-60,-80; 60,80], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=44,  
      rgbfillColor={255,170,170})),  
    Rectangle(extent=[-80,-2; -60,2], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),  
    Rectangle(extent=[60,-2; 80,2], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),  
    Line(points=[-40,-80; -40,80], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),  
    Line(points=[-20,-80; -20,80], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),  
    Line(points=[0,-80; 0,80], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),  
    Line(points=[20,-80; 20,80], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),  
    Line(points=[40,-80; 40,80], style(  
      color=0,  
      rgbcolor={0,0,0},  
      fillColor=0,  
      rgbfillColor={0,0,0},  
      fillPattern=1)),
```

```

        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=0,
        rgbfillColor={0,0,0},
        fillPattern=1))),
    Documentation(info="<html>
Este modelo es una muestra de cómo se debe montar la capa difusora.
</html>"));
    piezas.nexo nexo_menos
        annotation (extent=[-106,-16; -74,16]);
    piezas.nexo nexo_mas
        annotation (extent=[74,-16; 106,16]);
    annotation (Diagram);

    piezas.VC_difusora v1(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
        annotation (extent=[-64,60; -44,80]);
    piezas.TD_difusora d0(
        Do2h2og_ref=0,
        Dh2h2og_ref=2.82e-3,
        Do2k=0,
        Dh2k=7.853e-3,
        NUMvc=40) annotation (extent=[-78,38; -58,58]);
    piezas.VC_difusora v2(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
        annotation (extent=[-38,60; -18,80]);
    piezas.VC_difusora v3(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
        annotation (extent=[-10,60; 10,80]);
    piezas.VC_difusora v4(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
        annotation (extent=[18,60; 38,80]);
    piezas.VC_difusora v5(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
        annotation (extent=[44,60; 64,80]);
    piezas.TD_difusora d1(
        Do2h2og_ref=0,
        Dh2h2og_ref=2.82e-3,
        Do2k=0,
        Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,38; -32,58]);
    piezas.TD_difusora d2(
        Do2h2og_ref=0,
        Dh2h2og_ref=2.82e-3,
        Do2k=0,
        Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-24,38; -4,58]);
    piezas.TD_difusora d3(
        Do2h2og_ref=0,
        Dh2h2og_ref=2.82e-3,
        Do2k=0,
        Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,38; 24,58]);
    piezas.TD_difusora d4(
        Do2h2og_ref=0,
        Dh2h2og_ref=2.82e-3,
        Do2k=0,
        Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[30,38; 50,58]);

```

piezas.TD\_difusora d5(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,38; 80,58]);  
piezas.VC\_difusora v6(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-64,16; -44,36]);  
piezas.VC\_difusora v7(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-38,16; -18,36]);  
piezas.VC\_difusora v8(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-10,16; 10,36]);  
piezas.VC\_difusora v9(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[18,16; 38,36]);  
piezas.VC\_difusora v10(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[44,16; 64,36]);  
piezas.TD\_difusora d6(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,-6; -32,14]);  
piezas.TD\_difusora d7(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-24,-6; -4,14]);  
piezas.TD\_difusora d8(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,-6; 24,14]);  
piezas.TD\_difusora d9(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[30,-6; 50,14]);  
piezas.TD\_difusora d10(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,-6; 80,14]);  
piezas.VC\_difusora v11(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-64,-32; -44,-12]);  
piezas.VC\_difusora v12(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-38,-32; -18,-12]);  
piezas.VC\_difusora v13(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-10,-32; 10,-12]);  
piezas.VC\_difusora v14(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[18,-32; 38,-12]);  
piezas.VC\_difusora v15(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[44,-32; 64,-12]);

piezas.TD\_difusora d11(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,-54; -32,-34]);  
piezas.TD\_difusora d12(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-24,-54; -4,-34]);  
piezas.TD\_difusora d13(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,-54; 24,-34]);  
piezas.TD\_difusora d14(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[30,-54; 50,-34]);  
piezas.TD\_difusora d15(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,-54; 80,-34]);  
piezas.VC\_difusora v16(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-64,-80; -44,-60]);  
piezas.VC\_difusora v17(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-38,-80; -18,-60]);  
piezas.VC\_difusora v18(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-10,-80; 10,-60]);  
piezas.VC\_difusora v19(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[18,-80; 38,-60]);  
piezas.VC\_difusora v20(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[44,-80; 64,-60]);  
piezas.TD\_difusora d16(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,-102; -32,-82]);  
piezas.TD\_difusora d17(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-24,-102; -4,-82]);  
piezas.TD\_difusora d18(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,-102; 24,-82]);

```

piezas.TD_difusora d19(
  Do2h2og_ref=0,
  Dh2h2og_ref=2.82e-3,
  Do2k=0,
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[30,-102; 50,-82]);
piezas.TD_difusora d20(
  Do2h2og_ref=0,
  Dh2h2og_ref=2.82e-3,
  Do2k=0,
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,-102; 80,-82]);
equation

connect(nexo_menos, d0.nexo1) annotation (points=[-90,0; -90,48; -76,48],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d0.nexo2, v1.nexo1) annotation (points=[-60,48; -54,48; -54,62],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v1.nexo1, d1.nexo1) annotation (points=[-54,62; -54,48; -50,48],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d1.nexo2, v2.nexo1) annotation (points=[-34,48; -28,48; -28,62],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v2.nexo1, d2.nexo1) annotation (points=[-28,62; -28,48; -22,48],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo2, v3.nexo1) annotation (points=[-6,48; 0,48; 0,62], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v3.nexo1, d3.nexo1)
  annotation (points=[0,62; 6,48], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo2, v4.nexo1) annotation (points=[22,48; 28,48; 28,62],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v4.nexo1, d4.nexo1) annotation (points=[28,62; 28,48; 32,48],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo2, v5.nexo1) annotation (points=[48,48; 54,48; 54,62],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v5.nexo1, d5.nexo1) annotation (points=[54,62; 54,48; 62,48],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo2, v6.nexo1) annotation (points=[78,48; 84,48; 84,38; -68,
  38; -68,18; -54,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v6.nexo1, d6.nexo1)
  annotation (points=[-54,18; -50,4], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo2, v7.nexo1) annotation (points=[-34,4; -28,4; -28,18],
  style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v7.nexo1, d7.nexo1)
  annotation (points=[-28,18; -22,4], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo2, v8.nexo1) annotation (points=[-6,4; 0,4; 0,18], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v8.nexo1, d8.nexo1)
  annotation (points=[0,18; 0,4; 6,4], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo2, v9.nexo1) annotation (points=[22,4; 28,4; 28,18], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v9.nexo1, d9.nexo1) annotation (points=[28,18; 28,4; 32,4], style(
  color=0, rgbcolor={0,0,0}));

```

```

connect(d9.nexo2, v10.nexo1) annotation (points=[48,4; 54,4; 54,18],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v10.nexo1, d10.nexo1) annotation (points=[54,18; 54,4; 62,4],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo2, v11.nexo1) annotation (points=[78,4; 78,-8; -68,-8;
    -68,-30; -54,-30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v11.nexo1, d11.nexo1) annotation (points=[-54,-30; -54,-44; -50,
    -44], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo2, v12.nexo1) annotation (points=[-34,-44; -28,-44; -28,
    -30], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v12.nexo1, d12.nexo1) annotation (points=[-28,-30; -22,-44],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo2, v13.nexo1) annotation (points=[-6,-44; 0,-44; 0,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v13.nexo1, d13.nexo1) annotation (points=[0,-30; 0,-44; 6,-44],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo2, v14.nexo1) annotation (points=[22,-44; 28,-44; 28,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v14.nexo1, d14.nexo1) annotation (points=[28,-30; 28,-44; 32,-44],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo2, v15.nexo1) annotation (points=[48,-44; 54,-44; 54,-30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v15.nexo1, d15.nexo1) annotation (points=[54,-30; 54,-44; 62,-44],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo2, v16.nexo1) annotation (points=[78,-44; 80,-44; 80,-56;
    -68,-56; -68,-78; -54,-78], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v16.nexo1, d16.nexo1) annotation (points=[-54,-78; -54,-92; -50,
    -92], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo2, v17.nexo1) annotation (points=[-34,-92; -28,-92; -28,
    -78], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v17.nexo1, d17.nexo1) annotation (points=[-28,-78; -22,-92],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo2, v18.nexo1) annotation (points=[-6,-92; 0,-92; 0,-78],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v18.nexo1, d18.nexo1) annotation (points=[0,-78; 0,-92; 6,-92],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo2, v19.nexo1) annotation (points=[22,-92; 28,-92; 28,-78],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v19.nexo1, d19.nexo1) annotation (points=[28,-78; 28,-92; 32,-92],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo2, v20.nexo1) annotation (points=[48,-92; 54,-92; 54,-78],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(v20.nexo1, d20.nexo1) annotation (points=[54,-78; 54,-92; 62,-92],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d20.nexo2, nexo_mas) annotation (points=[78,-92; 90,-92; 90,0],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
end ejemplo_difusora_anodica;

```

```

model ejemplo_pila_montada
    piezas.VC_difusora d1(NUMvc=5,

```

No2inicial=0,  
 Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[-60,80; -40,100]);  
 piezas.VC\_difusora d2(NUMvc=5,  
 Nh2inicial=1e-3,  
 No2inicial=0) annotation (extent=[-30,80; -10,100]);  
 piezas.VC\_difusora d3(NUMvc=5,  
 No2inicial=0,  
 Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[0,80; 20,100]);  
 piezas.VC\_difusora d4(NUMvc=5,  
 No2inicial=0,  
 Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[30,80; 50,100]);  
 piezas.VC\_difusora d5(NUMvc=5,  
 No2inicial=0,  
 Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[60,80; 80,100]);  
 piezas.VC\_anodica a1(NUMvc=5) annotation (extent=[-60,40; -40,60]);  
 piezas.VC\_anodica a2(NUMvc=5) annotation (extent=[-30,40; -10,60]);  
 piezas.VC\_anodica a3(NUMvc=5) annotation (extent=[0,40; 20,60]);  
 piezas.VC\_anodica a4(NUMvc=5) annotation (extent=[30,40; 50,60]);  
 piezas.VC\_anodica a5(NUMvc=5) annotation (extent=[60,40; 80,60]);  
 piezas.VC\_membrana m1(NUMvc=5) annotation (extent=[-60,0; -40,20]);  
 piezas.VC\_membrana m2(NUMvc=5) annotation (extent=[-30,0; -10,20]);  
 piezas.VC\_membrana m3(NUMvc=5) annotation (extent=[0,0; 20,20]);  
 piezas.VC\_membrana m4(NUMvc=5) annotation (extent=[30,0; 50,20]);  
 piezas.VC\_membrana m5(NUMvc=5) annotation (extent=[60,0; 80,20]);  
 piezas.VC\_catalitica c1(NUMvc=5) annotation (extent=[-60,-40; -40,-20]);  
 piezas.VC\_catalitica c2(NUMvc=5) annotation (extent=[-30,-40; -10,-20]);  
 piezas.VC\_catalitica c3(NUMvc=5) annotation (extent=[0,-40; 20,-20]);  
 piezas.VC\_catalitica c4(NUMvc=5) annotation (extent=[30,-40; 50,-20]);  
 piezas.VC\_catalitica c5(NUMvc=5) annotation (extent=[60,-40; 80,-20]);  
 piezas.VC\_difusora d6(NUMvc=5) annotation (extent=[-60,-80; -40,-60]);  
 piezas.VC\_difusora d7(NUMvc=5) annotation (extent=[-30,-80; -10,-60]);  
 piezas.VC\_difusora d8(NUMvc=5) annotation (extent=[0,-80; 20,-60]);  
 piezas.VC\_difusora d9(NUMvc=5) annotation (extent=[30,-80; 50,-60]);  
 piezas.VC\_difusora d10(NUMvc=5) annotation (extent=[60,-80; 80,-60]);  
 piezas.TD\_difusora td0(  
 NUMvc=10,  
 Do2h2og\_ref=0,  
 Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
 Do2k=0,  
 Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-74,60; -54,80]);  
 piezas.TD\_difusora td1(  
 NUMvc=5,  
 Do2h2og\_ref=0,  
 Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
 Do2k=0,  
 Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-46,60; -26,80]);  
 piezas.TD\_difusora td2(  
 NUMvc=5,  
 Do2h2og\_ref=0,  
 Dh2h2og\_ref=2.82e-3,

```

Do2k=0,
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-16,60; 4,80]);
piezas.TD_difusora td3(
  NUMvc=5,
  Do2h2og_ref=0,
  Dh2h2og_ref=2.82e-3,
  Do2k=0,
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[14,60; 34,80]);
piezas.TD_difusora td4(
  NUMvc=5,
  Do2h2og_ref=0,
  Dh2h2og_ref=2.82e-3,
  Do2k=0,
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[46,60; 66,80]);
piezas.TD_difusora td5(
  NUMvc=5,
  Do2h2og_ref=0,
  Dh2h2og_ref=2.82e-3,
  Do2k=0,
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[74,60; 94,80]);
piezas.TD_anodica ta1(NUMvc=5) annotation (extent=[-46,20; -26,40]);
piezas.TD_anodica ta2(NUMvc=5) annotation (extent=[-16,20; 4,40]);
piezas.TD_anodica ta3(NUMvc=5) annotation (extent=[14,20; 34,40]);
piezas.TD_anodica ta4(NUMvc=5) annotation (extent=[46,20; 66,40]);
piezas.TD_anodica ta5(NUMvc=5) annotation (extent=[74,20; 94,40]);
piezas.TD_membrana tm1(NUMvc=5) annotation (extent=[-46,-20; -26,0]);
piezas.TD_membrana tm2(NUMvc=5) annotation (extent=[-16,-20; 4,0]);
piezas.TD_membrana tm3(NUMvc=5) annotation (extent=[14,-20; 34,0]);
piezas.TD_membrana tm4(NUMvc=5) annotation (extent=[46,-20; 66,0]);
piezas.TD_membrana tm5(NUMvc=5) annotation (extent=[74,-20; 94,0]);
piezas.TD_catalitica tc1(NUMvc=5) annotation (extent=[-46,-60; -26,-40]);
piezas.TD_catalitica tc2(NUMvc=5) annotation (extent=[-16,-60; 4,-40]);
piezas.TD_catalitica tc3(NUMvc=5) annotation (extent=[14,-60; 34,-40]);
piezas.TD_catalitica tc4(NUMvc=5) annotation (extent=[46,-60; 66,-40]);
piezas.TD_catalitica tc5(NUMvc=5) annotation (extent=[74,-60; 94,-40]);
piezas.TD_difusora td6(NUMvc=5) annotation (extent=[-46,-100; -26,-80]);
piezas.TD_difusora td7(NUMvc=5) annotation (extent=[-16,-100; 4,-80]);
piezas.TD_difusora td8(NUMvc=5) annotation (extent=[14,-100; 34,-80]);
piezas.TD_difusora td9(NUMvc=5) annotation (extent=[46,-100; 66,-80]);
piezas.TD_difusora td10(NUMvc=5) annotation (extent=[74,-100; 94,-80]);
annotation (
  Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},

```

```

    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}))),
Diagram,
experiment(
    StartTime=-150,

```

```

    StopTime=200,
    NumberOfIntervals=1000),
    experimentSetupOutput);
piezas.terminals terminales annotation (extent=[-92,-8; -72,12]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=0.001)
    annotation (extent=[-92,38; -72,58]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-102,14; -82,34]);
equation
connect(terminales.pin_negativo1, ground.p) annotation (points=[-88,8; -88,34; -92,
    34], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistor.p) annotation (points=[-92,34; -92,48], style(
    color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(terminales.pin_positivo1, resistor.n) annotation (points=[-76,8;
    -76,22; -72,22; -72,48], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
connect(terminales.nexo2, td0.nexo1) annotation (points=[-88,-4; -100,-4;
    -100,70; -72,70], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td0.nexo2, d1.nexo1) annotation (points=[-56,70; -50,70; -50,82],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d1.nexo1, td1.nexo1) annotation (points=[-50,82; -50,70; -44,70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td1.nexo2, d2.nexo1) annotation (points=[-28,70; -20,70; -20,82],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo1, td2.nexo1) annotation (points=[-20,82; -20,70; -14,70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td2.nexo2, d3.nexo1) annotation (points=[2,70; 10,70; 10,82],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo1, td3.nexo1) annotation (points=[10,82; 10,70; 16,70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td3.nexo2, d4.nexo1) annotation (points=[32,70; 40,70; 40,82],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo1, td4.nexo1) annotation (points=[40,82; 40,70; 48,70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td4.nexo2, d5.nexo1) annotation (points=[64,70; 70,70; 70,82],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo1, td5.nexo1) annotation (points=[70,82; 70,70; 76,70],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td5.nexo2, a1.nexo1) annotation (points=[92,70; 96,70; 96,60; -60,
    60; -60,42; -50,42], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a1.nexo1, ta1.nexo1) annotation (points=[-50,42; -50,30; -44,30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta1.nexo2, a2.nexo1) annotation (points=[-28,30; -20,30; -20,42],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a2.nexo1, ta2.nexo1) annotation (points=[-20,42; -20,30; -14,30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta2.nexo2, a3.nexo1) annotation (points=[2,30; 10,30; 10,42],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a3.nexo1, ta3.nexo1) annotation (points=[10,42; 10,30; 16,30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta3.nexo2, a4.nexo1) annotation (points=[32,30; 40,30; 40,42],

```

```

    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a4.nexo1, ta4.nexo1) annotation (points=[40,42; 40,30; 48,30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta4.nexo2, a5.nexo1) annotation (points=[64,30; 70,30; 70,42],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a5.nexo1, ta5.nexo1) annotation (points=[70,42; 70,30; 76,30],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta5.nexo2, m1.nexo1) annotation (points=[92,30; 96,30; 96,20; -60,
    20; -60,2; -50,2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m1.nexo1, tm1.nexo1) annotation (points=[-50,2; -50,-10; -44,-10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm1.nexo2, m2.nexo1) annotation (points=[-28,-10; -20,-10; -20,2],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m2.nexo1, tm2.nexo1) annotation (points=[-20,2; -20,-10; -14,-10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm2.nexo2, m3.nexo1) annotation (points=[2,-10; 10,-10; 10,2],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m3.nexo1, tm3.nexo1) annotation (points=[10,2; 10,-10; 16,-10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm3.nexo2, m4.nexo1) annotation (points=[32,-10; 40,-10; 40,2],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m4.nexo1, tm4.nexo1) annotation (points=[40,2; 40,-10; 48,-10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm4.nexo2, m5.nexo1) annotation (points=[64,-10; 70,-10; 70,2],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m5.nexo1, tm5.nexo1) annotation (points=[70,2; 70,-10; 76,-10],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm5.nexo2, c1.nexo1) annotation (points=[92,-10; 96,-10; 96,-20;
    -60,-20; -60,-38; -50,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c1.nexo1, tc1.nexo1) annotation (points=[-50,-38; -50,-50; -44,
    -50], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc1.nexo2, c2.nexo1) annotation (points=[-28,-50; -20,-50; -20,
    -38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c2.nexo1, tc2.nexo1) annotation (points=[-20,-38; -20,-50; -14,
    -50], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc2.nexo2, c3.nexo1) annotation (points=[2,-50; 10,-50; 10,-38],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c3.nexo1, tc3.nexo1) annotation (points=[10,-38; 10,-50; 16,-50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc3.nexo2, c4.nexo1) annotation (points=[32,-50; 40,-50; 40,-38],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c4.nexo1, tc4.nexo1) annotation (points=[40,-38; 40,-50; 48,-50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc4.nexo2, c5.nexo1) annotation (points=[64,-50; 70,-50; 70,-38],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c5.nexo1, tc5.nexo1) annotation (points=[70,-38; 70,-50; 76,-50],
    style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc5.nexo2, d6.nexo1) annotation (points=[92,-50; 96,-50; 96,-60;
    -60,-60; -60,-78; -50,-78], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo1, td6.nexo1) annotation (points=[-50,-78; -50,-90; -44,

```

```

-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td6.nexo2, d7.nexo1) annotation (points=[-28,-90; -20,-90; -20,
-78], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo1, td7.nexo1) annotation (points=[-20,-78; -20,-90; -14,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td7.nexo2, d8.nexo1) annotation (points=[2,-90; 10,-90; 10,-78],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo1, td8.nexo1) annotation (points=[10,-78; 10,-90; 16,-90],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td8.nexo2, d9.nexo1) annotation (points=[32,-90; 40,-90; 40,-78],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo1, td9.nexo1) annotation (points=[40,-78; 40,-90; 48,-90],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td9.nexo2, d10.nexo1) annotation (points=[64,-90; 70,-90; 70,-78],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo1, td10.nexo1) annotation (points=[70,-78; 70,-90; 76,-90],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td10.nexo2, terminales.nexo1) annotation (points=[92,-90; 96,-90;
96,-100; -76,-100; -76,-4], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
end ejemplo_pila_montada;
end modelos_compuestos;

```

```

package celula_combustible_PEM

```

```

"Contiene los modelos con los que haremos las pruebas"

```

```

model pila_PEM "Modelo completamente montado de la pila"

```

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,

```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Line(points=[-92,70; -76,70; -76,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Line(points=[90,70; 76,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})));
piezas.pin_positivo pin_positivo annotation (extent=[60,60; 80,80]);
piezas.pin_negativo pin_negativo annotation (extent=[-80,60; -60,80]);
piezas.terminales terminales annotation (extent=[-10,54; 10,74]);
piezas.VC_difusora d1(
    NUMvc=40,
    No2inicial=0,
    Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[-80,26; -72,34]);
piezas.VC_difusora d2(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-72,26; -64,34]);
piezas.VC_difusora d3(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-64,26; -56,34]);
piezas.VC_difusora d4(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-56,26; -48,34]);
piezas.VC_difusora d5(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-48,26; -40,34]);
piezas.VC_difusora d6(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-40,26; -32,34]);
piezas.VC_difusora d7(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-32,26; -24,34]);
piezas.VC_difusora d8(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-24,26; -16,34]);
piezas.VC_difusora d9(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-16,26; -8,34]);

```

piezas.VC\_difusora d10(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-8,26; 0,34]);  
piezas.VC\_difusora d11(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[0,26; 8,34]);  
piezas.VC\_difusora d12(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[8,26; 16,34]);  
piezas.VC\_difusora d13(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[16,26; 24,34]);  
piezas.VC\_difusora d14(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[24,26; 32,34]);  
piezas.VC\_difusora d15(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[32,26; 40,34]);  
piezas.VC\_difusora d16(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[40,26; 48,34]);  
piezas.VC\_difusora d17(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[48,26; 56,34]);  
piezas.VC\_difusora d18(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[56,26; 64,34]);  
piezas.VC\_difusora d19(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[64,26; 72,34]);  
piezas.VC\_difusora d20(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[72,26; 80,34]);  
piezas.VC\_anodica a1 annotation (extent=[-80,0; -72,8]);  
piezas.VC\_anodica a2 annotation (extent=[-72,0; -64,8]);  
piezas.VC\_anodica a3 annotation (extent=[-64,0; -56,8]);  
piezas.VC\_anodica a4 annotation (extent=[-56,0; -48,8]);  
piezas.VC\_anodica a5 annotation (extent=[-48,0; -40,8]);  
piezas.VC\_anodica a6 annotation (extent=[-40,0; -32,8]);  
piezas.VC\_anodica a7 annotation (extent=[-32,0; -24,8]);  
piezas.VC\_anodica a8 annotation (extent=[-24,0; -16,8]);  
piezas.VC\_anodica a9 annotation (extent=[-16,0; -8,8]);  
piezas.VC\_anodica a10 annotation (extent=[-8,0; 0,8]);  
piezas.VC\_anodica a11 annotation (extent=[0,0; 8,8]);  
piezas.VC\_anodica a12 annotation (extent=[8,0; 16,8]);  
piezas.VC\_anodica a13 annotation (extent=[16,0; 24,8]);  
piezas.VC\_anodica a14 annotation (extent=[24,0; 32,8]);  
piezas.VC\_anodica a15 annotation (extent=[32,0; 40,8]);  
piezas.VC\_anodica a16 annotation (extent=[40,0; 48,8]);  
piezas.VC\_anodica a17 annotation (extent=[48,0; 56,8]);  
piezas.VC\_anodica a18 annotation (extent=[56,0; 64,8]);  
piezas.VC\_anodica a19 annotation (extent=[64,0; 72,8]);  
piezas.VC\_anodica a20 annotation (extent=[72,0; 80,8]);  
piezas.VC\_membrana m1 annotation (extent=[-80,-26; -72,-18]);  
piezas.VC\_membrana m2 annotation (extent=[-72,-26; -64,-18]);  
piezas.VC\_membrana m3 annotation (extent=[-64,-26; -56,-18]);  
piezas.VC\_membrana m4 annotation (extent=[-56,-26; -48,-18]);  
piezas.VC\_membrana m5 annotation (extent=[-48,-26; -40,-18]);  
piezas.VC\_membrana m6 annotation (extent=[-40,-26; -32,-18]);  
piezas.VC\_membrana m7 annotation (extent=[-32,-26; -24,-18]);  
piezas.VC\_membrana m8 annotation (extent=[-24,-26; -16,-18]);

piezas.VC\_membrana m9 annotation (extent=[-16,-26; -8,-18]);  
piezas.VC\_membrana m10 annotation (extent=[-8,-26; 0,-18]);  
piezas.VC\_membrana m11 annotation (extent=[0,-26; 8,-18]);  
piezas.VC\_membrana m12 annotation (extent=[8,-26; 16,-18]);  
piezas.VC\_membrana m13 annotation (extent=[16,-26; 24,-18]);  
piezas.VC\_membrana m14 annotation (extent=[24,-26; 32,-18]);  
piezas.VC\_membrana m15 annotation (extent=[32,-26; 40,-18]);  
piezas.VC\_membrana m16 annotation (extent=[40,-26; 48,-18]);  
piezas.VC\_membrana m17 annotation (extent=[48,-26; 56,-18]);  
piezas.VC\_membrana m18 annotation (extent=[56,-26; 64,-18]);  
piezas.VC\_membrana m19 annotation (extent=[64,-26; 72,-18]);  
piezas.VC\_membrana m20 annotation (extent=[72,-26; 80,-18]);  
piezas.VC\_catalitica c1 annotation (extent=[-80,-52; -72,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c2 annotation (extent=[-72,-52; -64,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c3 annotation (extent=[-64,-52; -56,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c4 annotation (extent=[-56,-52; -48,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c5 annotation (extent=[-48,-52; -40,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c6 annotation (extent=[-40,-52; -32,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c7 annotation (extent=[-32,-52; -24,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c8 annotation (extent=[-24,-52; -16,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c9 annotation (extent=[-16,-52; -8,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c10 annotation (extent=[-8,-52; 0,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c11 annotation (extent=[0,-52; 8,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c12 annotation (extent=[8,-52; 16,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c13 annotation (extent=[16,-52; 24,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c14 annotation (extent=[24,-52; 32,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c15 annotation (extent=[32,-52; 40,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c16 annotation (extent=[40,-52; 48,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c17 annotation (extent=[48,-52; 56,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c18 annotation (extent=[56,-52; 64,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c19 annotation (extent=[64,-52; 72,-44]);  
piezas.VC\_catalitica c20 annotation (extent=[72,-52; 80,-44]);  
piezas.VC\_difusora d21 annotation (extent=[-80,-78; -72,-70]);  
piezas.VC\_difusora d22 annotation (extent=[-72,-78; -64,-70]);  
piezas.VC\_difusora d23 annotation (extent=[-64,-78; -56,-70]);  
piezas.VC\_difusora d24 annotation (extent=[-56,-78; -48,-70]);  
piezas.VC\_difusora d25 annotation (extent=[-48,-78; -40,-70]);  
piezas.VC\_difusora d26 annotation (extent=[-40,-78; -32,-70]);  
piezas.VC\_difusora d27 annotation (extent=[-32,-78; -24,-70]);  
piezas.VC\_difusora d28 annotation (extent=[-24,-78; -16,-70]);  
piezas.VC\_difusora d29 annotation (extent=[-16,-78; -8,-70]);  
piezas.VC\_difusora d30 annotation (extent=[-8,-78; 0,-70]);  
piezas.VC\_difusora d31 annotation (extent=[0,-78; 8,-70]);  
piezas.VC\_difusora d32 annotation (extent=[8,-78; 16,-70]);  
piezas.VC\_difusora d33 annotation (extent=[16,-78; 24,-70]);  
piezas.VC\_difusora d34 annotation (extent=[24,-78; 32,-70]);  
piezas.VC\_difusora d35 annotation (extent=[32,-78; 40,-70]);  
piezas.VC\_difusora d36 annotation (extent=[40,-78; 48,-70]);  
piezas.VC\_difusora d37 annotation (extent=[48,-78; 56,-70]);  
piezas.VC\_difusora d38 annotation (extent=[56,-78; 64,-70]);

piezas.VC\_difusora d39 annotation (extent=[64,-78; 72,-70]);  
piezas.VC\_difusora d40(NUMvc=40) annotation (extent=[72,-78; 80,-70]);  
piezas.TD\_difusora td0(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3,  
  NUMvc=40) annotation (extent=[-84,14; -76,22]);  
piezas.TD\_difusora td1(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-76,14; -68,22]);  
piezas.TD\_difusora td2(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-68,14; -60,22]);  
piezas.TD\_difusora td3(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-60,14; -52,22]);  
piezas.TD\_difusora td4(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,14; -44,22]);  
piezas.TD\_difusora td5(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3,  
  NUMvc=40) annotation (extent=[-44,14; -36,22]);  
piezas.TD\_difusora td6(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-36,14; -28,22]);  
piezas.TD\_difusora td7(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-28,14; -20,22]);  
piezas.TD\_difusora td8(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-20,14; -12,22]);  
piezas.TD\_difusora td9(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-12,14; -4,22]);

Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-12,14; -4,22]);  
piezas.TD\_difusora td10(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3,  
NUMvc=40) annotation (extent=[-4,14; 4,22]);  
piezas.TD\_difusora td11(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,14; 12,22]);  
piezas.TD\_difusora td12(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[12,14; 20,22]);  
piezas.TD\_difusora td13(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[20,14; 28,22]);  
piezas.TD\_difusora td14(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[28,14; 36,22]);  
piezas.TD\_difusora td15(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3,  
NUMvc=40) annotation (extent=[36,14; 44,22]);  
piezas.TD\_difusora td16(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[44,14; 52,22]);  
piezas.TD\_difusora td17(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[52,14; 60,22]);  
piezas.TD\_difusora td18(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,

Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,14; 68,22]);  
piezas.TD\_difusora td19(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[68,14; 76,22]);  
piezas.TD\_difusora td20(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[76,14; 84,22]);  
piezas.TD\_anodica ta1 annotation (extent=[-76,-12; -68,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta2 annotation (extent=[-68,-12; -60,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta3 annotation (extent=[-60,-12; -52,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta4 annotation (extent=[-52,-12; -44,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta5 annotation (extent=[-44,-12; -36,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta6 annotation (extent=[-36,-12; -28,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta7 annotation (extent=[-28,-12; -20,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta8 annotation (extent=[-20,-12; -12,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta9 annotation (extent=[-12,-12; -4,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta10 annotation (extent=[-4,-12; 4,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta11 annotation (extent=[4,-12; 12,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta12 annotation (extent=[12,-12; 20,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta13 annotation (extent=[20,-12; 28,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta14 annotation (extent=[28,-12; 36,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta15 annotation (extent=[36,-12; 44,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta16 annotation (extent=[44,-12; 52,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta17 annotation (extent=[52,-12; 60,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta18 annotation (extent=[60,-12; 68,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta19 annotation (extent=[68,-12; 76,-4]);  
piezas.TD\_anodica ta20 annotation (extent=[76,-12; 84,-4]);  
piezas.TD\_membrana tm1 annotation (extent=[-76,-38; -68,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm2 annotation (extent=[-68,-38; -60,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm3 annotation (extent=[-60,-38; -52,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm4 annotation (extent=[-52,-38; -44,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm5 annotation (extent=[-44,-38; -36,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm6 annotation (extent=[-36,-38; -28,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm7 annotation (extent=[-28,-38; -20,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm8 annotation (extent=[-20,-38; -12,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm9 annotation (extent=[-12,-38; -4,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm10 annotation (extent=[-4,-38; 4,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm11 annotation (extent=[4,-38; 12,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm12 annotation (extent=[12,-38; 20,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm13 annotation (extent=[20,-38; 28,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm14 annotation (extent=[28,-38; 36,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm15 annotation (extent=[36,-38; 44,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm16 annotation (extent=[44,-38; 52,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm17 annotation (extent=[52,-38; 60,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm18 annotation (extent=[60,-38; 68,-30]);  
piezas.TD\_membrana tm19 annotation (extent=[68,-38; 76,-30]);

piezas.TD\_membrana tm20 annotation (extent=[76,-38; 84,-30]);  
 piezas.TD\_catalitica tc1 annotation (extent=[-76,-64; -68,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc2 annotation (extent=[-68,-64; -60,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc3 annotation (extent=[-60,-64; -52,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc4 annotation (extent=[-52,-64; -44,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc5 annotation (extent=[-44,-64; -36,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc6 annotation (extent=[-36,-64; -28,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc7 annotation (extent=[-28,-64; -20,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc8 annotation (extent=[-20,-64; -12,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc9 annotation (extent=[-12,-64; -4,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc10 annotation (extent=[-4,-64; 4,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc11 annotation (extent=[4,-64; 12,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc12 annotation (extent=[12,-64; 20,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc13 annotation (extent=[20,-64; 28,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc14 annotation (extent=[28,-64; 36,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc15 annotation (extent=[36,-64; 44,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc16 annotation (extent=[44,-64; 52,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc17 annotation (extent=[52,-64; 60,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc18 annotation (extent=[60,-64; 68,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc19 annotation (extent=[68,-64; 76,-56]);  
 piezas.TD\_catalitica tc20 annotation (extent=[76,-64; 84,-56]);  
 piezas.TD\_difusora td21 annotation (extent=[-76,-90; -68,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td22 annotation (extent=[-68,-90; -60,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td23 annotation (extent=[-60,-90; -52,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td24 annotation (extent=[-52,-90; -44,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td25 annotation (extent=[-44,-90; -36,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td26 annotation (extent=[-36,-90; -28,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td27 annotation (extent=[-28,-90; -20,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td28 annotation (extent=[-20,-90; -12,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td29 annotation (extent=[-12,-90; -4,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td30 annotation (extent=[-4,-90; 4,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td31 annotation (extent=[4,-90; 12,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td32 annotation (extent=[12,-90; 20,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td33 annotation (extent=[20,-90; 28,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td34 annotation (extent=[28,-90; 36,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td35 annotation (extent=[36,-90; 44,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td36 annotation (extent=[44,-90; 52,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td37 annotation (extent=[52,-90; 60,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td38 annotation (extent=[60,-90; 68,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td39 annotation (extent=[68,-90; 76,-82]);  
 piezas.TD\_difusora td40(NUMvc=40) annotation (extent=[76,-90; 84,-82]);  
 equation  
 connect(terminales.nexo2, td0.nexo1) annotation (points=[-6,58; -6,44;  
 -83.2,44; -83.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(td0.nexo2, d1.nexo1) annotation (points=[-76.8,18; -76,18; -76,  
 26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(d1.nexo1, td1.nexo1) annotation (points=[-76,26.8; -76,22.4; -76,  
 18; -75.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(td1.nexo2, d2.nexo1) annotation (points=[-68.8,18; -68,18; -68,  
 26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));

```
connect(d2.nexo1, td2.nexo1) annotation (points=[-68,26.8; -68,22.4; -68,
18; -67.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td2.nexo2, d3.nexo1) annotation (points=[-60.8,18; -60,18; -60,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo1, td3.nexo1) annotation (points=[-60,26.8; -60,22.4; -60,
18; -59.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td3.nexo2, d4.nexo1) annotation (points=[-52.8,18; -52,18; -52,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo1, td4.nexo1) annotation (points=[-52,26.8; -52,22.4; -52,
18; -51.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td4.nexo2, d5.nexo1) annotation (points=[-44.8,18; -44,18; -44,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo1, td5.nexo1) annotation (points=[-44,26.8; -44,22.4; -44,
18; -43.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td5.nexo2, d6.nexo1) annotation (points=[-36.8,18; -36,18; -36,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo1, td6.nexo1) annotation (points=[-36,26.8; -36,22.4; -36,
18; -35.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td6.nexo2, d7.nexo1) annotation (points=[-28.8,18; -28,18; -28,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo1, td7.nexo1) annotation (points=[-28,26.8; -28,22.4; -28,
18; -27.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td7.nexo2, d8.nexo1) annotation (points=[-20.8,18; -20,18; -20,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo1, td8.nexo1) annotation (points=[-20,26.8; -20,22.4; -20,
18; -19.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td8.nexo2, d9.nexo1) annotation (points=[-12.8,18; -12,18; -12,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo1, td9.nexo1) annotation (points=[-12,26.8; -12,22.4; -12,
18; -11.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td9.nexo2, d10.nexo1) annotation (points=[-4.8,18; -4,18; -4,26.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo1, td10.nexo1) annotation (points=[-4,26.8; -4,22.4; -4,
18; -3.2,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td10.nexo2, d11.nexo1) annotation (points=[3.2,18; 4,18; 4,26.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo1, td11.nexo1) annotation (points=[4,26.8; 4,22.4; 4,18;
4.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td11.nexo2, d12.nexo1) annotation (points=[11.2,18; 12,18; 12,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo1, td12.nexo1) annotation (points=[12,26.8; 12,22.4; 12,
18; 12.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td12.nexo2, d13.nexo1) annotation (points=[19.2,18; 20,18; 20,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo1, td13.nexo1) annotation (points=[20,26.8; 20,22.4; 20,
18; 20.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td13.nexo2, d14.nexo1) annotation (points=[27.2,18; 28,18; 28,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo1, td14.nexo1) annotation (points=[28,26.8; 28,22.4; 28,
18; 28.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```
connect(td14.nexo2, d15.nexo1) annotation (points=[35.2,18; 36,18; 36,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo1, td15.nexo1) annotation (points=[36,26.8; 36,22.4; 36,
18; 36.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td15.nexo2, d16.nexo1) annotation (points=[43.2,18; 44,18; 44,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo1, td16.nexo1) annotation (points=[44,26.8; 44,22.4; 44,
18; 44.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td16.nexo2, d17.nexo1) annotation (points=[51.2,18; 52,18; 52,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo1, td17.nexo1) annotation (points=[52,26.8; 52,22.4; 52,
18; 52.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td17.nexo2, d18.nexo1) annotation (points=[59.2,18; 60,18; 60,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo1, td18.nexo1) annotation (points=[60,26.8; 60,22.4; 60,
18; 60.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td18.nexo2, d19.nexo1) annotation (points=[67.2,18; 68,18; 68,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo1, td19.nexo1) annotation (points=[68,26.8; 68,22.4; 68,
18; 68.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td19.nexo2, d20.nexo1) annotation (points=[75.2,18; 76,18; 76,
26.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d20.nexo1, td20.nexo1) annotation (points=[76,26.8; 76,22.4; 76,
18; 76.8,18], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td20.nexo2, a1.nexo1) annotation (points=[83.2,18; 86,18; 86,12;
-84,12; -84,0.8; -76,0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a1.nexo1, ta1.nexo1) annotation (points=[-76,0.8; -76,0.8; -76,-8;
-75.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta1.nexo2, a2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-8; -68,-8; -68,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a2.nexo1, ta2.nexo1) annotation (points=[-68,0.8; -68,0.8; -68,-8;
-67.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta2.nexo2, a3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-8; -60,-8; -60,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a3.nexo1, ta3.nexo1) annotation (points=[-60,0.8; -60,0.8; -60,-8;
-59.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta3.nexo2, a4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-8; -52,-8; -52,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a4.nexo1, ta4.nexo1) annotation (points=[-52,0.8; -52,0.8; -52,-8;
-51.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta4.nexo2, a5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-8; -44,-8; -44,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a5.nexo1, ta5.nexo1) annotation (points=[-44,0.8; -44,0.8; -44,-8;
-43.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta5.nexo2, a6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-8; -36,-8; -36,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a6.nexo1, ta6.nexo1) annotation (points=[-36,0.8; -36,0.8; -36,-8;
-35.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta6.nexo2, a7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-8; -28,-8; -28,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```
connect(a7.nexo1, ta7.nexo1) annotation (points=[-28,0.8; -28,0.8; -28,-8;
-27.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta7.nexo2, a8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-8; -20,-8; -20,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a8.nexo1, ta8.nexo1) annotation (points=[-20,0.8; -20,0.8; -20,-8;
-19.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta8.nexo2, a9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-8; -12,-8; -12,
0.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a9.nexo1, ta9.nexo1) annotation (points=[-12,0.8; -12,0.8; -12,-8;
-11.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta9.nexo2, a10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-8; -4,-8; -4,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a10.nexo1, ta10.nexo1) annotation (points=[-4,0.8; -4,0.8; -4,-8;
-3.2,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta10.nexo2, a11.nexo1) annotation (points=[3.2,-8; 4,-8; 4,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a11.nexo1, ta11.nexo1) annotation (points=[4,0.8; 4,0.8; 4,-8;
4.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta11.nexo2, a12.nexo1) annotation (points=[11.2,-8; 12,-8; 12,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a12.nexo1, ta12.nexo1) annotation (points=[12,0.8; 12,0.8; 12,-8;
12.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta12.nexo2, a13.nexo1) annotation (points=[19.2,-8; 20,-8; 20,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a13.nexo1, ta13.nexo1) annotation (points=[20,0.8; 20,0.8; 20,-8;
20.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta13.nexo2, a14.nexo1) annotation (points=[27.2,-8; 28,-8; 28,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a14.nexo1, ta14.nexo1) annotation (points=[28,0.8; 28,0.8; 28,-8;
28.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta14.nexo2, a15.nexo1) annotation (points=[35.2,-8; 36,-8; 36,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a15.nexo1, ta15.nexo1) annotation (points=[36,0.8; 36,0.8; 36,-8;
36.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta15.nexo2, a16.nexo1) annotation (points=[43.2,-8; 44,-8; 44,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a16.nexo1, ta16.nexo1) annotation (points=[44,0.8; 44,0.8; 44,-8;
44.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta16.nexo2, a17.nexo1) annotation (points=[51.2,-8; 52,-8; 52,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a17.nexo1, ta17.nexo1) annotation (points=[52,0.8; 52,0.8; 52,-8;
52.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta17.nexo2, a18.nexo1) annotation (points=[59.2,-8; 60,-8; 60,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a18.nexo1, ta18.nexo1) annotation (points=[60,0.8; 60,0.8; 60,-8;
60.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta18.nexo2, a19.nexo1) annotation (points=[67.2,-8; 68,-8; 68,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a19.nexo1, ta19.nexo1) annotation (points=[68,0.8; 68,0.8; 68,-8;
68.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```
connect(ta19.nexo2, a20.nexo1) annotation (points=[75.2,-8; 76,-8; 76,0.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a20.nexo1, ta20.nexo1) annotation (points=[76,0.8; 76,0.8; 76,-8;
76.8,-8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta20.nexo2, m1.nexo1) annotation (points=[83.2,-8; 86,-8; 86,-14;
-84,-14; -84,-25.2; -76,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m1.nexo1, tm1.nexo1) annotation (points=[-76,-25.2; -76,-29.6;
-76,-34; -75.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm1.nexo2, m2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-34; -68,-34; -68,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m2.nexo1, tm2.nexo1) annotation (points=[-68,-25.2; -68,-29.6;
-68,-34; -67.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm2.nexo2, m3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-34; -60,-34; -60,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m3.nexo1, tm3.nexo1) annotation (points=[-60,-25.2; -60,-29.6;
-60,-34; -59.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm3.nexo2, m4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-34; -52,-34; -52,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m4.nexo1, tm4.nexo1) annotation (points=[-52,-25.2; -52,-29.6;
-52,-34; -51.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm4.nexo2, m5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-34; -44,-34; -44,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m5.nexo1, tm5.nexo1) annotation (points=[-44,-25.2; -44,-29.6;
-44,-34; -43.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm5.nexo2, m6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-34; -36,-34; -36,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m6.nexo1, tm6.nexo1) annotation (points=[-36,-25.2; -36,-29.6;
-36,-34; -35.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm6.nexo2, m7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-34; -28,-34; -28,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m7.nexo1, tm7.nexo1) annotation (points=[-28,-25.2; -28,-29.6;
-28,-34; -27.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm7.nexo2, m8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-34; -20,-34; -20,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m8.nexo1, tm8.nexo1) annotation (points=[-20,-25.2; -20,-29.6;
-20,-34; -19.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm8.nexo2, m9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-34; -12,-34; -12,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m9.nexo1, tm9.nexo1) annotation (points=[-12,-25.2; -12,-29.6;
-12,-34; -11.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm9.nexo2, m10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-34; -4,-34; -4,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m10.nexo1, tm10.nexo1) annotation (points=[-4,-25.2; -4,-29.6; -4,
-34; -3.2,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm10.nexo2, m11.nexo1) annotation (points=[3.2,-34; 4,-34; 4,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m11.nexo1, tm11.nexo1) annotation (points=[4,-25.2; 4,-29.6; 4,
-34; 4.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm11.nexo2, m12.nexo1) annotation (points=[11.2,-34; 12,-34; 12,
-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```
connect(m12.nexo1, tm12.nexo1) annotation (points=[12,-25.2; 12,-29.6; 12,-34; 12.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm12.nexo2, m13.nexo1) annotation (points=[19.2,-34; 20,-34; 20,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m13.nexo1, tm13.nexo1) annotation (points=[20,-25.2; 20,-29.6; 20,-34; 20.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm13.nexo2, m14.nexo1) annotation (points=[27.2,-34; 28,-34; 28,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m14.nexo1, tm14.nexo1) annotation (points=[28,-25.2; 28,-29.6; 28,-34; 28.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm14.nexo2, m15.nexo1) annotation (points=[35.2,-34; 36,-34; 36,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m15.nexo1, tm15.nexo1) annotation (points=[36,-25.2; 36,-29.6; 36,-34; 36.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm15.nexo2, m16.nexo1) annotation (points=[43.2,-34; 44,-34; 44,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m16.nexo1, tm16.nexo1) annotation (points=[44,-25.2; 44,-29.6; 44,-34; 44.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm16.nexo2, m17.nexo1) annotation (points=[51.2,-34; 52,-34; 52,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m17.nexo1, tm17.nexo1) annotation (points=[52,-25.2; 52,-29.6; 52,-34; 52.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm17.nexo2, m18.nexo1) annotation (points=[59.2,-34; 60,-34; 60,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m18.nexo1, tm18.nexo1) annotation (points=[60,-25.2; 60,-29.6; 60,-34; 60.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm18.nexo2, m19.nexo1) annotation (points=[67.2,-34; 68,-34; 68,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m19.nexo1, tm19.nexo1) annotation (points=[68,-25.2; 68,-29.6; 68,-34; 68.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm19.nexo2, m20.nexo1) annotation (points=[75.2,-34; 76,-34; 76,-25.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m20.nexo1, tm20.nexo1) annotation (points=[76,-25.2; 76,-29.6; 76,-34; 76.8,-34], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm20.nexo2, c1.nexo1) annotation (points=[83.2,-34; 86,-34; 86,-40; -84,-40; -84,-51.2; -76,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c1.nexo1, tc1.nexo1) annotation (points=[-76,-51.2; -76,-55.6; -76,-60; -75.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc1.nexo2, c2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-60; -68,-60; -68,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c2.nexo1, tc2.nexo1) annotation (points=[-68,-51.2; -68,-55.6; -68,-60; -67.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc2.nexo2, c3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-60; -60,-60; -60,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c3.nexo1, tc3.nexo1) annotation (points=[-60,-51.2; -60,-55.6; -60,-60; -59.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc3.nexo2, c4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-60; -52,-60; -52,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c4.nexo1, tc4.nexo1) annotation (points=[-52,-51.2; -52,-55.6; -52,-60; -51.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```
connect(tc4.nexo2, c5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-60; -44,-60; -44,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c5.nexo1, tc5.nexo1) annotation (points=[-44,-51.2; -44,-55.6;
-44,-60; -43.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc5.nexo2, c6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-60; -36,-60; -36,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c6.nexo1, tc6.nexo1) annotation (points=[-36,-51.2; -36,-55.6;
-36,-60; -35.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc6.nexo2, c7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-60; -28,-60; -28,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c7.nexo1, tc7.nexo1) annotation (points=[-28,-51.2; -28,-55.6;
-28,-60; -27.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc7.nexo2, c8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-60; -20,-60; -20,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c8.nexo1, tc8.nexo1) annotation (points=[-20,-51.2; -20,-55.6;
-20,-60; -19.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc8.nexo2, c9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-60; -12,-60; -12,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c9.nexo1, tc9.nexo1) annotation (points=[-12,-51.2; -12,-55.6;
-12,-60; -11.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc9.nexo2, c10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-60; -4,-60; -4,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c10.nexo1, tc10.nexo1) annotation (points=[-4,-51.2; -4,-55.6; -4,
-60; -3.2,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc10.nexo2, c11.nexo1) annotation (points=[3.2,-60; 4,-60; 4,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c11.nexo1, tc11.nexo1) annotation (points=[4,-51.2; 4,-55.6; 4,
-60; 4.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc11.nexo2, c12.nexo1) annotation (points=[11.2,-60; 12,-60; 12,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c12.nexo1, tc12.nexo1) annotation (points=[12,-51.2; 12,-55.6; 12,
-60; 12.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc12.nexo2, c13.nexo1) annotation (points=[19.2,-60; 20,-60; 20,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c13.nexo1, tc13.nexo1) annotation (points=[20,-51.2; 20,-55.6; 20,
-60; 20.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc13.nexo2, c14.nexo1) annotation (points=[27.2,-60; 28,-60; 28,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c14.nexo1, tc14.nexo1) annotation (points=[28,-51.2; 28,-55.6; 28,
-60; 28.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc14.nexo2, c15.nexo1) annotation (points=[35.2,-60; 36,-60; 36,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c15.nexo1, tc15.nexo1) annotation (points=[36,-51.2; 36,-55.6; 36,
-60; 36.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc15.nexo2, c16.nexo1) annotation (points=[43.2,-60; 44,-60; 44,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c16.nexo1, tc16.nexo1) annotation (points=[44,-51.2; 44,-55.6; 44,
-60; 44.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc16.nexo2, c17.nexo1) annotation (points=[51.2,-60; 52,-60; 52,
-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```
connect(c17.nexo1, tc17.nexo1) annotation (points=[52,-51.2; 52,-55.6; 52,-60; 52.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc17.nexo2, c18.nexo1) annotation (points=[59.2,-60; 60,-60; 60,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c18.nexo1, tc18.nexo1) annotation (points=[60,-51.2; 60,-55.6; 60,-60; 60.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc18.nexo2, c19.nexo1) annotation (points=[67.2,-60; 68,-60; 68,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c19.nexo1, tc19.nexo1) annotation (points=[68,-51.2; 68,-60; 68.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc19.nexo2, c20.nexo1) annotation (points=[75.2,-60; 76,-60; 76,-51.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c20.nexo1, tc20.nexo1) annotation (points=[76,-51.2; 76,-55.6; 76,-60; 76.8,-60], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc20.nexo2, d21.nexo1) annotation (points=[83.2,-60; 86,-60; 86,-66; -84,-66; -84,-77.2; -76,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d21.nexo1, td21.nexo1) annotation (points=[-76,-77.2; -76,-86; -75.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td21.nexo2, d22.nexo1) annotation (points=[-68.8,-86; -68,-86; -68,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d22.nexo1, td22.nexo1) annotation (points=[-68,-77.2; -68,-81.6; -68,-86; -67.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td22.nexo2, d23.nexo1) annotation (points=[-60.8,-86; -60,-86; -60,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d23.nexo1, td23.nexo1) annotation (points=[-60,-77.2; -60,-81.6; -60,-86; -59.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td23.nexo2, d24.nexo1) annotation (points=[-52.8,-86; -52,-86; -52,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d24.nexo1, td24.nexo1) annotation (points=[-52,-77.2; -52,-81.6; -52,-86; -51.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td24.nexo2, d25.nexo1) annotation (points=[-44.8,-86; -44,-86; -44,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d25.nexo1, td25.nexo1) annotation (points=[-44,-77.2; -44,-81.6; -44,-86; -43.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td25.nexo2, d26.nexo1) annotation (points=[-36.8,-86; -36,-86; -36,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d26.nexo1, td26.nexo1) annotation (points=[-36,-77.2; -36,-81.6; -36,-86; -35.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td26.nexo2, d27.nexo1) annotation (points=[-28.8,-86; -28,-86; -28,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d27.nexo1, td27.nexo1) annotation (points=[-28,-77.2; -28,-81.6; -28,-86; -27.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td27.nexo2, d28.nexo1) annotation (points=[-20.8,-86; -20,-86; -20,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d28.nexo1, td28.nexo1) annotation (points=[-20,-77.2; -20,-81.6; -20,-86; -19.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td28.nexo2, d29.nexo1) annotation (points=[-12.8,-86; -12,-86; -12,-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d29.nexo1, td29.nexo1) annotation (points=[-12,-77.2; -12,-81.6; -12,-86; -11.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
```

```

connect(td29.nexo2, d30.nexo1) annotation (points=[-4.8,-86; -4,-86; -4,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d30.nexo1, td30.nexo1) annotation (points=[-4,-77.2; -4,-81.6; -4,
-86; -3.2,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td30.nexo2, d31.nexo1) annotation (points=[3.2,-86; 4,-86; 4,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d31.nexo1, td31.nexo1) annotation (points=[4,-77.2; 4,-81.6; 4,
-86; 4.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td31.nexo2, d32.nexo1) annotation (points=[11.2,-86; 12,-86; 12,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d32.nexo1, td32.nexo1) annotation (points=[12,-77.2; 12,-81.6; 12,
-86; 12.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td32.nexo2, d33.nexo1) annotation (points=[19.2,-86; 20,-86; 20,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d33.nexo1, td33.nexo1) annotation (points=[20,-77.2; 20,-81.6; 20,
-86; 20.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td33.nexo2, d34.nexo1) annotation (points=[27.2,-86; 28,-86; 28,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d34.nexo1, td34.nexo1) annotation (points=[28,-77.2; 28,-81.6; 28,
-86; 28.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td34.nexo2, d35.nexo1) annotation (points=[35.2,-86; 36,-86; 36,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d35.nexo1, td35.nexo1) annotation (points=[36,-77.2; 36,-81.6; 36,
-86; 36.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td35.nexo2, d36.nexo1) annotation (points=[43.2,-86; 44,-86; 44,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d36.nexo1, td36.nexo1) annotation (points=[44,-77.2; 44,-81.6; 44,
-86; 44.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td36.nexo2, d37.nexo1) annotation (points=[51.2,-86; 52,-86; 52,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d37.nexo1, td37.nexo1) annotation (points=[52,-77.2; 52,-81.6; 52,
-86; 52.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td37.nexo2, d38.nexo1) annotation (points=[59.2,-86; 60,-86; 60,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d38.nexo1, td38.nexo1) annotation (points=[60,-77.2; 60,-81.6; 60,
-86; 60.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td38.nexo2, d39.nexo1) annotation (points=[67.2,-86; 68,-86; 68,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d39.nexo1, td39.nexo1) annotation (points=[68,-77.2; 68,-81.6; 68,
-86; 68.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td39.nexo2, d40.nexo1) annotation (points=[75.2,-86; 76,-86; 76,
-77.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d40.nexo1, td40.nexo1) annotation (points=[76,-77.2; 76,-81.6; 76,
-86; 76.8,-86], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td40.nexo2, terminales.nexo1) annotation (points=[83.2,-86; 92,
-86; 92,44; 6,44; 6,58], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(terminales.pin_positivo1, pin_positivo)
annotation (points=[6,70; 70,70], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
connect(terminales.pin_negativo1, pin_negativo) annotation (points=[-6,70;
-70,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));

```

```

end pila_PEM;

model pila_PEM_polarizacion_escalones
  "Modelo completamente montado de la pila"

  annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=30,
      rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170})),
    Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[0,-80; 0,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[40,-80; 40,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[60,-80; 60,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},

```

```

fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
Line(points=[-20,50; -10,50; -10,60; 0,60; 0,70; 10,70; 10,80; 20,80;
    20,90; 30,90], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    thickness=2)),
Line(points=[30,90; 28,92], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    thickness=2)),
Line(points=[30,90; 28,88], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    thickness=2))),
experiment(StopTime=150, NumberOfIntervals=1500),
experimentSetupOutput);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-54,46; -34,66]);
Celula_PEM_3.piezas.resistencia_polarizacion resistencia_polarizacion
    annotation (extent=[-10,76; 10,96],rotation=0);
piezas.terminals terminals annotation (extent=[-10,50; 10,70]);
piezas.VC_difusora d1(
    NUMvc=40,
    No2inicial=0,
    Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[-80,22; -72,30]);
piezas.VC_difusora d2(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-72,22; -64,30]);
piezas.VC_difusora d3(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-64,22; -56,30]);
piezas.VC_difusora d4(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-56,22; -48,30]);
piezas.VC_difusora d5(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-48,22; -40,30]);
piezas.VC_difusora d6(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-40,22; -32,30]);
piezas.VC_difusora d7(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-32,22; -24,30]);
piezas.VC_difusora d8(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
    annotation (extent=[-24,22; -16,30]);
piezas.VC_difusora d9(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)

```

annotation (extent=[-16,22; -8,30]);  
piezas.VC\_difusora d10(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-8,22; 0,30]);  
piezas.VC\_difusora d11(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[0,22; 8,30]);  
piezas.VC\_difusora d12(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[8,22; 16,30]);  
piezas.VC\_difusora d13(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[16,22; 24,30]);  
piezas.VC\_difusora d14(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[24,22; 32,30]);  
piezas.VC\_difusora d15(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[32,22; 40,30]);  
piezas.VC\_difusora d16(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[40,22; 48,30]);  
piezas.VC\_difusora d17(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[48,22; 56,30]);  
piezas.VC\_difusora d18(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[56,22; 64,30]);  
piezas.VC\_difusora d19(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[64,22; 72,30]);  
piezas.VC\_difusora d20(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[72,22; 80,30]);  
piezas.VC\_anodica a1 annotation (extent=[-80,-4; -72,4]);  
piezas.VC\_anodica a2 annotation (extent=[-72,-4; -64,4]);  
piezas.VC\_anodica a3 annotation (extent=[-64,-4; -56,4]);  
piezas.VC\_anodica a4 annotation (extent=[-56,-4; -48,4]);  
piezas.VC\_anodica a5 annotation (extent=[-48,-4; -40,4]);  
piezas.VC\_anodica a6 annotation (extent=[-40,-4; -32,4]);  
piezas.VC\_anodica a7 annotation (extent=[-32,-4; -24,4]);  
piezas.VC\_anodica a8 annotation (extent=[-24,-4; -16,4]);  
piezas.VC\_anodica a9 annotation (extent=[-16,-4; -8,4]);  
piezas.VC\_anodica a10 annotation (extent=[-8,-4; 0,4]);  
piezas.VC\_anodica a11 annotation (extent=[0,-4; 8,4]);  
piezas.VC\_anodica a12 annotation (extent=[8,-4; 16,4]);  
piezas.VC\_anodica a13 annotation (extent=[16,-4; 24,4]);  
piezas.VC\_anodica a14 annotation (extent=[24,-4; 32,4]);  
piezas.VC\_anodica a15 annotation (extent=[32,-4; 40,4]);  
piezas.VC\_anodica a16 annotation (extent=[40,-4; 48,4]);  
piezas.VC\_anodica a17 annotation (extent=[48,-4; 56,4]);  
piezas.VC\_anodica a18 annotation (extent=[56,-4; 64,4]);  
piezas.VC\_anodica a19 annotation (extent=[64,-4; 72,4]);  
piezas.VC\_anodica a20 annotation (extent=[72,-4; 80,4]);  
piezas.VC\_membrana m1 annotation (extent=[-80,-30; -72,-22]);  
piezas.VC\_membrana m2 annotation (extent=[-72,-30; -64,-22]);  
piezas.VC\_membrana m3 annotation (extent=[-64,-30; -56,-22]);  
piezas.VC\_membrana m4 annotation (extent=[-56,-30; -48,-22]);  
piezas.VC\_membrana m5 annotation (extent=[-48,-30; -40,-22]);  
piezas.VC\_membrana m6 annotation (extent=[-40,-30; -32,-22]);  
piezas.VC\_membrana m7 annotation (extent=[-32,-30; -24,-22]);

piezas.VC\_membrana m8 annotation (extent=[-24,-30; -16,-22]);  
piezas.VC\_membrana m9 annotation (extent=[-16,-30; -8,-22]);  
piezas.VC\_membrana m10 annotation (extent=[-8,-30; 0,-22]);  
piezas.VC\_membrana m11 annotation (extent=[0,-30; 8,-22]);  
piezas.VC\_membrana m12 annotation (extent=[8,-30; 16,-22]);  
piezas.VC\_membrana m13 annotation (extent=[16,-30; 24,-22]);  
piezas.VC\_membrana m14 annotation (extent=[24,-30; 32,-22]);  
piezas.VC\_membrana m15 annotation (extent=[32,-30; 40,-22]);  
piezas.VC\_membrana m16 annotation (extent=[40,-30; 48,-22]);  
piezas.VC\_membrana m17 annotation (extent=[48,-30; 56,-22]);  
piezas.VC\_membrana m18 annotation (extent=[56,-30; 64,-22]);  
piezas.VC\_membrana m19 annotation (extent=[64,-30; 72,-22]);  
piezas.VC\_membrana m20 annotation (extent=[72,-30; 80,-22]);  
piezas.VC\_catalitica c1 annotation (extent=[-80,-56; -72,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c2 annotation (extent=[-72,-56; -64,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c3 annotation (extent=[-64,-56; -56,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c4 annotation (extent=[-56,-56; -48,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c5 annotation (extent=[-48,-56; -40,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c6 annotation (extent=[-40,-56; -32,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c7 annotation (extent=[-32,-56; -24,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c8 annotation (extent=[-24,-56; -16,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c9 annotation (extent=[-16,-56; -8,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c10 annotation (extent=[-8,-56; 0,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c11 annotation (extent=[0,-56; 8,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c12 annotation (extent=[8,-56; 16,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c13 annotation (extent=[16,-56; 24,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c14 annotation (extent=[24,-56; 32,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c15 annotation (extent=[32,-56; 40,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c16 annotation (extent=[40,-56; 48,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c17 annotation (extent=[48,-56; 56,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c18 annotation (extent=[56,-56; 64,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c19 annotation (extent=[64,-56; 72,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c20 annotation (extent=[72,-56; 80,-48]);  
piezas.VC\_difusora d21 annotation (extent=[-80,-82; -72,-74]);  
piezas.VC\_difusora d22 annotation (extent=[-72,-82; -64,-74]);  
piezas.VC\_difusora d23 annotation (extent=[-64,-82; -56,-74]);  
piezas.VC\_difusora d24 annotation (extent=[-56,-82; -48,-74]);  
piezas.VC\_difusora d25 annotation (extent=[-48,-82; -40,-74]);  
piezas.VC\_difusora d26 annotation (extent=[-40,-82; -32,-74]);  
piezas.VC\_difusora d27 annotation (extent=[-32,-82; -24,-74]);  
piezas.VC\_difusora d28 annotation (extent=[-24,-82; -16,-74]);  
piezas.VC\_difusora d29 annotation (extent=[-16,-82; -8,-74]);  
piezas.VC\_difusora d30 annotation (extent=[-8,-82; 0,-74]);  
piezas.VC\_difusora d31 annotation (extent=[0,-82; 8,-74]);  
piezas.VC\_difusora d32 annotation (extent=[8,-82; 16,-74]);  
piezas.VC\_difusora d33 annotation (extent=[16,-82; 24,-74]);  
piezas.VC\_difusora d34 annotation (extent=[24,-82; 32,-74]);  
piezas.VC\_difusora d35 annotation (extent=[32,-82; 40,-74]);  
piezas.VC\_difusora d36 annotation (extent=[40,-82; 48,-74]);  
piezas.VC\_difusora d37 annotation (extent=[48,-82; 56,-74]);

piezas.VC\_difusora d38 annotation (extent=[56,-82; 64,-74]);  
piezas.VC\_difusora d39 annotation (extent=[64,-82; 72,-74]);  
piezas.VC\_difusora d40(NUMvc=40) annotation (extent=[72,-82; 80,-74]);  
piezas.TD\_difusora td0(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3,  
  NUMvc=40) annotation (extent=[-84,10; -76,18]);  
piezas.TD\_difusora td1(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-76,10; -68,18]);  
piezas.TD\_difusora td2(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-68,10; -60,18]);  
piezas.TD\_difusora td3(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-60,10; -52,18]);  
piezas.TD\_difusora td4(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,10; -44,18]);  
piezas.TD\_difusora td5(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3,  
  NUMvc=40) annotation (extent=[-44,10; -36,18]);  
piezas.TD\_difusora td6(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-36,10; -28,18]);  
piezas.TD\_difusora td7(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-28,10; -20,18]);  
piezas.TD\_difusora td8(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-20,10; -12,18]);

piezas.TD\_difusora td9(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-12,10; -4,18]);

piezas.TD\_difusora td10(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3,  
NUMvc=40) annotation (extent=[-4,10; 4,18]);

piezas.TD\_difusora td11(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,10; 12,18]);

piezas.TD\_difusora td12(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[12,10; 20,18]);

piezas.TD\_difusora td13(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[20,10; 28,18]);

piezas.TD\_difusora td14(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[28,10; 36,18]);

piezas.TD\_difusora td15(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3,  
NUMvc=40) annotation (extent=[36,10; 44,18]);

piezas.TD\_difusora td16(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[44,10; 52,18]);

piezas.TD\_difusora td17(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[52,10; 60,18]);

piezas.TD\_difusora td18(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,

Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,10; 68,18]);  
piezas.TD\_difusora td19(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[68,10; 76,18]);  
piezas.TD\_difusora td20(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[76,10; 84,18]);  
piezas.TD\_anodica ta1 annotation (extent=[-76,-16; -68,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta2 annotation (extent=[-68,-16; -60,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta3 annotation (extent=[-60,-16; -52,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta4 annotation (extent=[-52,-16; -44,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta5 annotation (extent=[-44,-16; -36,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta6 annotation (extent=[-36,-16; -28,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta7 annotation (extent=[-28,-16; -20,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta8 annotation (extent=[-20,-16; -12,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta9 annotation (extent=[-12,-16; -4,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta10 annotation (extent=[-4,-16; 4,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta11 annotation (extent=[4,-16; 12,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta12 annotation (extent=[12,-16; 20,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta13 annotation (extent=[20,-16; 28,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta14 annotation (extent=[28,-16; 36,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta15 annotation (extent=[36,-16; 44,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta16 annotation (extent=[44,-16; 52,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta17 annotation (extent=[52,-16; 60,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta18 annotation (extent=[60,-16; 68,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta19 annotation (extent=[68,-16; 76,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta20 annotation (extent=[76,-16; 84,-8]);  
piezas.TD\_membrana tm1 annotation (extent=[-76,-42; -68,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm2 annotation (extent=[-68,-42; -60,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm3 annotation (extent=[-60,-42; -52,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm4 annotation (extent=[-52,-42; -44,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm5 annotation (extent=[-44,-42; -36,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm6 annotation (extent=[-36,-42; -28,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm7 annotation (extent=[-28,-42; -20,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm8 annotation (extent=[-20,-42; -12,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm9 annotation (extent=[-12,-42; -4,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm10 annotation (extent=[-4,-42; 4,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm11 annotation (extent=[4,-42; 12,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm12 annotation (extent=[12,-42; 20,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm13 annotation (extent=[20,-42; 28,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm14 annotation (extent=[28,-42; 36,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm15 annotation (extent=[36,-42; 44,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm16 annotation (extent=[44,-42; 52,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm17 annotation (extent=[52,-42; 60,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm18 annotation (extent=[60,-42; 68,-34]);

piezas.TD\_membrana tm19 annotation (extent=[68,-42; 76,-34]);  
 piezas.TD\_membrana tm20 annotation (extent=[76,-42; 84,-34]);  
 piezas.TD\_catalitica tc1 annotation (extent=[-76,-68; -68,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc2 annotation (extent=[-68,-68; -60,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc3 annotation (extent=[-60,-68; -52,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc4 annotation (extent=[-52,-68; -44,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc5 annotation (extent=[-44,-68; -36,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc6 annotation (extent=[-36,-68; -28,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc7 annotation (extent=[-28,-68; -20,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc8 annotation (extent=[-20,-68; -12,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc9 annotation (extent=[-12,-68; -4,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc10 annotation (extent=[-4,-68; 4,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc11 annotation (extent=[4,-68; 12,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc12 annotation (extent=[12,-68; 20,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc13 annotation (extent=[20,-68; 28,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc14 annotation (extent=[28,-68; 36,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc15 annotation (extent=[36,-68; 44,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc16 annotation (extent=[44,-68; 52,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc17 annotation (extent=[52,-68; 60,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc18 annotation (extent=[60,-68; 68,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc19 annotation (extent=[68,-68; 76,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc20 annotation (extent=[76,-68; 84,-60]);  
 piezas.TD\_difusora td21 annotation (extent=[-76,-94; -68,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td22 annotation (extent=[-68,-94; -60,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td23 annotation (extent=[-60,-94; -52,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td24 annotation (extent=[-52,-94; -44,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td25 annotation (extent=[-44,-94; -36,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td26 annotation (extent=[-36,-94; -28,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td27 annotation (extent=[-28,-94; -20,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td28 annotation (extent=[-20,-94; -12,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td29 annotation (extent=[-12,-94; -4,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td30 annotation (extent=[-4,-94; 4,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td31 annotation (extent=[4,-94; 12,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td32 annotation (extent=[12,-94; 20,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td33 annotation (extent=[20,-94; 28,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td34 annotation (extent=[28,-94; 36,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td35 annotation (extent=[36,-94; 44,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td36 annotation (extent=[44,-94; 52,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td37 annotation (extent=[52,-94; 60,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td38 annotation (extent=[60,-94; 68,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td39 annotation (extent=[68,-94; 76,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td40(NUMvc=40) annotation (extent=[76,-94; 84,-86]);  
 equation  
 connect(terminales.nexo2, td0.nexo1) annotation (points=[-6,54; -6,40;  
 -83.2,40; -83.2,14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(td0.nexo2, d1.nexo1) annotation (points=[-76.8,14; -76,14; -76,  
 22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(d1.nexo1, td1.nexo1) annotation (points=[-76,22.8; -76,14; -75.2,  
 14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(td1.nexo2, d2.nexo1) annotation (points=[-68.8,14; -68,14; -68,

```
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo1, td2.nexo1) annotation (points=[-68,22.8; -68,14; -67.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td2.nexo2, d3.nexo1) annotation (points=[-60.8,14; -60,14; -60,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo1, td3.nexo1) annotation (points=[-60,22.8; -60,14; -59.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td3.nexo2, d4.nexo1) annotation (points=[-52.8,14; -52,14; -52,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo1, td4.nexo1) annotation (points=[-52,22.8; -52,14; -51.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td4.nexo2, d5.nexo1) annotation (points=[-44.8,14; -44,14; -44,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo1, td5.nexo1) annotation (points=[-44,22.8; -44,14; -43.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td5.nexo2, d6.nexo1) annotation (points=[-36.8,14; -36,14; -36,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo1, td6.nexo1) annotation (points=[-36,22.8; -36,14; -35.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td6.nexo2, d7.nexo1) annotation (points=[-28.8,14; -28,14; -28,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo1, td7.nexo1) annotation (points=[-28,22.8; -28,14; -27.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td7.nexo2, d8.nexo1) annotation (points=[-20.8,14; -20,14; -20,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo1, td8.nexo1) annotation (points=[-20,22.8; -20,14; -19.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td8.nexo2, d9.nexo1) annotation (points=[-12.8,14; -12,14; -12,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo1, td9.nexo1) annotation (points=[-12,22.8; -12,14; -11.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td9.nexo2, d10.nexo1) annotation (points=[-4.8,14; -4,14; -4,22.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo1, td10.nexo1) annotation (points=[-4,22.8; -4,14; -3.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td10.nexo2, d11.nexo1) annotation (points=[3.2,14; 4,14; 4,22.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo1, td11.nexo1) annotation (points=[4,22.8; 4,14; 4.8,14],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td11.nexo2, d12.nexo1) annotation (points=[11.2,14; 12,14; 12,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo1, td12.nexo1) annotation (points=[12,22.8; 12,14; 12.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td12.nexo2, d13.nexo1) annotation (points=[19.2,14; 20,14; 20,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo1, td13.nexo1) annotation (points=[20,22.8; 20,14; 20.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td13.nexo2, d14.nexo1) annotation (points=[27.2,14; 28,14; 28,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo1, td14.nexo1) annotation (points=[28,22.8; 28,14; 28.8,
```

```

14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td14.nexo2, d15.nexo1) annotation (points=[35.2,14; 36,14; 36,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo1, td15.nexo1) annotation (points=[36,22.8; 36,14; 36.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td15.nexo2, d16.nexo1) annotation (points=[43.2,14; 44,14; 44,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo1, td16.nexo1) annotation (points=[44,22.8; 44,14; 44.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td16.nexo2, d17.nexo1) annotation (points=[51.2,14; 52,14; 52,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo1, td17.nexo1) annotation (points=[52,22.8; 52,14; 52.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td17.nexo2, d18.nexo1) annotation (points=[59.2,14; 60,14; 60,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo1, td18.nexo1) annotation (points=[60,22.8; 60,14; 60.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td18.nexo2, d19.nexo1) annotation (points=[67.2,14; 68,14; 68,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo1, td19.nexo1) annotation (points=[68,22.8; 68,14; 68.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td19.nexo2, d20.nexo1) annotation (points=[75.2,14; 76,14; 76,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d20.nexo1, td20.nexo1) annotation (points=[76,22.8; 76,14; 76.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td20.nexo2, a1.nexo1) annotation (points=[83.2,14; 86,14; 86,8;
-84,8; -84,-3.2; -76,-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a1.nexo1, ta1.nexo1) annotation (points=[-76,-3.2; -76,-12; -75.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta1.nexo2, a2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-12; -68,-12; -68,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a2.nexo1, ta2.nexo1) annotation (points=[-68,-3.2; -68,-12; -67.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta2.nexo2, a3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-12; -60,-12; -60,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a3.nexo1, ta3.nexo1) annotation (points=[-60,-3.2; -60,-12; -59.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta3.nexo2, a4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-12; -52,-12; -52,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a4.nexo1, ta4.nexo1) annotation (points=[-52,-3.2; -52,-12; -51.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta4.nexo2, a5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-12; -44,-12; -44,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a5.nexo1, ta5.nexo1) annotation (points=[-44,-3.2; -44,-12; -43.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta5.nexo2, a6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-12; -36,-12; -36,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a6.nexo1, ta6.nexo1) annotation (points=[-36,-3.2; -36,-12; -35.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta6.nexo2, a7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-12; -28,-12; -28,

```

```
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a7.nexo1, ta7.nexo1) annotation (points=[-28,-3.2; -28,-12; -27.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta7.nexo2, a8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-12; -20,-12; -20,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a8.nexo1, ta8.nexo1) annotation (points=[-20,-3.2; -20,-12; -19.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta8.nexo2, a9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-12; -12,-12; -12,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a9.nexo1, ta9.nexo1) annotation (points=[-12,-3.2; -12,-12; -11.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta9.nexo2, a10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-12; -4,-12; -4,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a10.nexo1, ta10.nexo1) annotation (points=[-4,-3.2; -4,-12; -3.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta10.nexo2, a11.nexo1) annotation (points=[3.2,-12; 4,-12; 4,-3.2],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a11.nexo1, ta11.nexo1) annotation (points=[4,-3.2; 4,-12; 4.8,-12],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta11.nexo2, a12.nexo1) annotation (points=[11.2,-12; 12,-12; 12,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a12.nexo1, ta12.nexo1) annotation (points=[12,-3.2; 12,-12; 12.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta12.nexo2, a13.nexo1) annotation (points=[19.2,-12; 20,-12; 20,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a13.nexo1, ta13.nexo1) annotation (points=[20,-3.2; 20,-12; 20.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta13.nexo2, a14.nexo1) annotation (points=[27.2,-12; 28,-12; 28,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a14.nexo1, ta14.nexo1) annotation (points=[28,-3.2; 28,-12; 28.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta14.nexo2, a15.nexo1) annotation (points=[35.2,-12; 36,-12; 36,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a15.nexo1, ta15.nexo1) annotation (points=[36,-3.2; 36,-12; 36.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta15.nexo2, a16.nexo1) annotation (points=[43.2,-12; 44,-12; 44,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a16.nexo1, ta16.nexo1) annotation (points=[44,-3.2; 44,-12; 44.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta16.nexo2, a17.nexo1) annotation (points=[51.2,-12; 52,-12; 52,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a17.nexo1, ta17.nexo1) annotation (points=[52,-3.2; 52,-12; 52.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta17.nexo2, a18.nexo1) annotation (points=[59.2,-12; 60,-12; 60,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a18.nexo1, ta18.nexo1) annotation (points=[60,-3.2; 60,-12; 60.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta18.nexo2, a19.nexo1) annotation (points=[67.2,-12; 68,-12; 68,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a19.nexo1, ta19.nexo1) annotation (points=[68,-3.2; 68,-12; 68.8,
```

```
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta19.nexo2, a20.nexo1) annotation (points=[75.2,-12; 76,-12; 76,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a20.nexo1, ta20.nexo1) annotation (points=[76,-3.2; 76,-12; 76.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta20.nexo2, m1.nexo1) annotation (points=[83.2,-12; 86,-12; 86,
-18; -84,-18; -84,-29.2; -76,-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m1.nexo1, tm1.nexo1) annotation (points=[-76,-29.2; -76,-38;
-75.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm1.nexo2, m2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-38; -68,-38; -68,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m2.nexo1, tm2.nexo1) annotation (points=[-68,-29.2; -68,-38;
-67.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm2.nexo2, m3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-38; -60,-38; -60,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m3.nexo1, tm3.nexo1) annotation (points=[-60,-29.2; -60,-38;
-59.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm3.nexo2, m4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-38; -52,-38; -52,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m4.nexo1, tm4.nexo1) annotation (points=[-52,-29.2; -52,-38;
-51.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm4.nexo2, m5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-38; -44,-38; -44,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m5.nexo1, tm5.nexo1) annotation (points=[-44,-29.2; -44,-38;
-43.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm5.nexo2, m6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-38; -36,-38; -36,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m6.nexo1, tm6.nexo1) annotation (points=[-36,-29.2; -36,-38;
-35.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm6.nexo2, m7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-38; -28,-38; -28,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m7.nexo1, tm7.nexo1) annotation (points=[-28,-29.2; -28,-38;
-27.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm7.nexo2, m8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-38; -20,-38; -20,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m8.nexo1, tm8.nexo1) annotation (points=[-20,-29.2; -20,-38;
-19.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm8.nexo2, m9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-38; -12,-38; -12,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m9.nexo1, tm9.nexo1) annotation (points=[-12,-29.2; -12,-38;
-11.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm9.nexo2, m10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-38; -4,-38; -4,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m10.nexo1, tm10.nexo1) annotation (points=[-4,-29.2; -4,-38; -3.2,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm10.nexo2, m11.nexo1) annotation (points=[3.2,-38; 4,-38; 4,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m11.nexo1, tm11.nexo1) annotation (points=[4,-29.2; 4,-38; 4.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm11.nexo2, m12.nexo1) annotation (points=[11.2,-38; 12,-38; 12,
```

```

-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m12.nexo1, tm12.nexo1) annotation (points=[12,-29.2; 12,-38; 12.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm12.nexo2, m13.nexo1) annotation (points=[19.2,-38; 20,-38; 20,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m13.nexo1, tm13.nexo1) annotation (points=[20,-29.2; 20,-38; 20.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm13.nexo2, m14.nexo1) annotation (points=[27.2,-38; 28,-38; 28,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m14.nexo1, tm14.nexo1) annotation (points=[28,-29.2; 28,-38; 28.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm14.nexo2, m15.nexo1) annotation (points=[35.2,-38; 36,-38; 36,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m15.nexo1, tm15.nexo1) annotation (points=[36,-29.2; 36,-38; 36.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm15.nexo2, m16.nexo1) annotation (points=[43.2,-38; 44,-38; 44,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m16.nexo1, tm16.nexo1) annotation (points=[44,-29.2; 44,-38; 44.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm16.nexo2, m17.nexo1) annotation (points=[51.2,-38; 52,-38; 52,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m17.nexo1, tm17.nexo1) annotation (points=[52,-29.2; 52,-38; 52.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm17.nexo2, m18.nexo1) annotation (points=[59.2,-38; 60,-38; 60,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m18.nexo1, tm18.nexo1) annotation (points=[60,-29.2; 60,-38; 60.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm18.nexo2, m19.nexo1) annotation (points=[67.2,-38; 68,-38; 68,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m19.nexo1, tm19.nexo1) annotation (points=[68,-29.2; 68,-38; 68.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm19.nexo2, m20.nexo1) annotation (points=[75.2,-38; 76,-38; 76,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m20.nexo1, tm20.nexo1) annotation (points=[76,-29.2; 76,-38; 76.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm20.nexo2, c1.nexo1) annotation (points=[83.2,-38; 86,-38; 86,
-44; -84,-44; -84,-55.2; -76,-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c1.nexo1, tc1.nexo1) annotation (points=[-76,-55.2; -76,-64;
-75.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc1.nexo2, c2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-64; -68,-64; -68,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c2.nexo1, tc2.nexo1) annotation (points=[-68,-55.2; -68,-64;
-67.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc2.nexo2, c3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-64; -60,-64; -60,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c3.nexo1, tc3.nexo1) annotation (points=[-60,-55.2; -60,-64;
-59.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc3.nexo2, c4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-64; -52,-64; -52,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c4.nexo1, tc4.nexo1) annotation (points=[-52,-55.2; -52,-64;

```

```
-51.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc4.nexo2, c5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-64; -44,-64; -44,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c5.nexo1, tc5.nexo1) annotation (points=[-44,-55.2; -44,-64;
-43.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc5.nexo2, c6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-64; -36,-64; -36,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c6.nexo1, tc6.nexo1) annotation (points=[-36,-55.2; -36,-64;
-35.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc6.nexo2, c7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-64; -28,-64; -28,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c7.nexo1, tc7.nexo1) annotation (points=[-28,-55.2; -28,-64;
-27.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc7.nexo2, c8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-64; -20,-64; -20,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c8.nexo1, tc8.nexo1) annotation (points=[-20,-55.2; -20,-64;
-19.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc8.nexo2, c9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-64; -12,-64; -12,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c9.nexo1, tc9.nexo1) annotation (points=[-12,-55.2; -12,-64;
-11.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc9.nexo2, c10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-64; -4,-64; -4,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c10.nexo1, tc10.nexo1) annotation (points=[-4,-55.2; -4,-64; -3.2,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc10.nexo2, c11.nexo1) annotation (points=[3.2,-64; 4,-64; 4,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c11.nexo1, tc11.nexo1) annotation (points=[4,-55.2; 4,-64; 4.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc11.nexo2, c12.nexo1) annotation (points=[11.2,-64; 12,-64; 12,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c12.nexo1, tc12.nexo1) annotation (points=[12,-55.2; 12,-64; 12.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc12.nexo2, c13.nexo1) annotation (points=[19.2,-64; 20,-64; 20,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c13.nexo1, tc13.nexo1) annotation (points=[20,-55.2; 20,-64; 20.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc13.nexo2, c14.nexo1) annotation (points=[27.2,-64; 28,-64; 28,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c14.nexo1, tc14.nexo1) annotation (points=[28,-55.2; 28,-64; 28.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc14.nexo2, c15.nexo1) annotation (points=[35.2,-64; 36,-64; 36,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c15.nexo1, tc15.nexo1) annotation (points=[36,-55.2; 36,-64; 36.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc15.nexo2, c16.nexo1) annotation (points=[43.2,-64; 44,-64; 44,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c16.nexo1, tc16.nexo1) annotation (points=[44,-55.2; 44,-64; 44.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc16.nexo2, c17.nexo1) annotation (points=[51.2,-64; 52,-64; 52,
```

```
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c17.nexo1, tc17.nexo1) annotation (points=[52,-55.2; 52,-64; 52.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc17.nexo2, c18.nexo1) annotation (points=[59.2,-64; 60,-64; 60,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c18.nexo1, tc18.nexo1) annotation (points=[60,-55.2; 60,-64; 60.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc18.nexo2, c19.nexo1) annotation (points=[67.2,-64; 68,-64; 68,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c19.nexo1, tc19.nexo1) annotation (points=[68,-55.2; 68,-64; 68.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc19.nexo2, c20.nexo1) annotation (points=[75.2,-64; 76,-64; 76,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c20.nexo1, tc20.nexo1) annotation (points=[76,-55.2; 76,-64; 76.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc20.nexo2, d21.nexo1) annotation (points=[83.2,-64; 86,-64; 86,
-70; -84,-70; -84,-81.2; -76,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d21.nexo1, td21.nexo1) annotation (points=[-76,-81.2; -76,-90;
-75.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td21.nexo2, d22.nexo1) annotation (points=[-68.8,-90; -68,-90;
-68,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d22.nexo1, td22.nexo1) annotation (points=[-68,-81.2; -68,-90;
-67.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td22.nexo2, d23.nexo1) annotation (points=[-60.8,-90; -60,-90;
-60,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d23.nexo1, td23.nexo1) annotation (points=[-60,-81.2; -60,-90;
-59.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td23.nexo2, d24.nexo1) annotation (points=[-52.8,-90; -52,-90;
-52,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d24.nexo1, td24.nexo1) annotation (points=[-52,-81.2; -52,-90;
-51.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td24.nexo2, d25.nexo1) annotation (points=[-44.8,-90; -44,-90;
-44,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d25.nexo1, td25.nexo1) annotation (points=[-44,-81.2; -44,-90;
-43.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td25.nexo2, d26.nexo1) annotation (points=[-36.8,-90; -36,-90;
-36,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d26.nexo1, td26.nexo1) annotation (points=[-36,-81.2; -36,-90;
-35.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td26.nexo2, d27.nexo1) annotation (points=[-28.8,-90; -28,-90;
-28,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d27.nexo1, td27.nexo1) annotation (points=[-28,-81.2; -28,-90;
-27.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td27.nexo2, d28.nexo1) annotation (points=[-20.8,-90; -20,-90;
-20,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d28.nexo1, td28.nexo1) annotation (points=[-20,-81.2; -20,-90;
-19.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td28.nexo2, d29.nexo1) annotation (points=[-12.8,-90; -12,-90;
-12,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d29.nexo1, td29.nexo1) annotation (points=[-12,-81.2; -12,-90;
```

```

-11.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td29.nexo2, d30.nexo1) annotation (points=[-4.8,-90; -4,-90; -4,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d30.nexo1, td30.nexo1) annotation (points=[-4,-81.2; -4,-90; -3.2,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td30.nexo2, d31.nexo1) annotation (points=[3.2,-90; 4,-90; 4,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d31.nexo1, td31.nexo1) annotation (points=[4,-81.2; 4,-90; 4.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td31.nexo2, d32.nexo1) annotation (points=[11.2,-90; 12,-90; 12,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d32.nexo1, td32.nexo1) annotation (points=[12,-81.2; 12,-90; 12.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td32.nexo2, d33.nexo1) annotation (points=[19.2,-90; 20,-90; 20,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d33.nexo1, td33.nexo1) annotation (points=[20,-81.2; 20,-90; 20.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td33.nexo2, d34.nexo1) annotation (points=[27.2,-90; 28,-90; 28,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d34.nexo1, td34.nexo1) annotation (points=[28,-81.2; 28,-90; 28.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td34.nexo2, d35.nexo1) annotation (points=[35.2,-90; 36,-90; 36,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d35.nexo1, td35.nexo1) annotation (points=[36,-81.2; 36,-90; 36.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td35.nexo2, d36.nexo1) annotation (points=[43.2,-90; 44,-90; 44,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d36.nexo1, td36.nexo1) annotation (points=[44,-81.2; 44,-90; 44.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td36.nexo2, d37.nexo1) annotation (points=[51.2,-90; 52,-90; 52,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d37.nexo1, td37.nexo1) annotation (points=[52,-81.2; 52,-90; 52.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td37.nexo2, d38.nexo1) annotation (points=[59.2,-90; 60,-90; 60,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d38.nexo1, td38.nexo1) annotation (points=[60,-81.2; 60,-90; 60.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td38.nexo2, d39.nexo1) annotation (points=[67.2,-90; 68,-90; 68,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d39.nexo1, td39.nexo1) annotation (points=[68,-81.2; 68,-90; 68.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td39.nexo2, d40.nexo1) annotation (points=[75.2,-90; 76,-90; 76,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d40.nexo1, td40.nexo1) annotation (points=[76,-81.2; 76,-90; 76.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td40.nexo2, terminales.nexo1) annotation (points=[83.2,-90; 92,
-90; 92,40; 6,40; 6,54], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(terminales.pin_negativo1, ground.p) annotation (points=[-6,66;
-44,66], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistencia_polarizacion.pin_negativo1) annotation (

```

```

    points=[-44,66; -44,87; -7,87], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(terminales.pin_positivo1, resistencia_polarizacion.pin_positivo1)
    annotation (points=[6,66; 40,66; 40,87; 7,87], style(color=1, rgbcolor=
        {255,0,0}));
end pila_PEM_polarizacion_escalones;

model pila_PEM_polarizacion_lineal "Modelo completamente montado de la pila"

annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170})),
    Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[0,-80; 0,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[40,-80; 40,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[60,-80; 60,20], style(
        color=0,

```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
Line(points=[-18,50; 22,90], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    thickness=2)),
Line(points=[22,90; 18,90], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    thickness=2)),
Line(points=[22,90; 22,86], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    thickness=2))),
experiment(StopTime=800, NumberOfIntervals=1600),
experimentSetupOutput);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
annotation (extent=[-44,46; -24,66]);
piezas.corriente_polarizacion corriente_polarizacion
annotation (extent=[-10,78; 10,98], rotation=0);
piezas.terminals terminales annotation (extent=[-10,50; 10,70]);
piezas.VC_difusora d1(
    NUMvc=40,
    No2inicial=0,
    Nh2inicial=1e-3) annotation (extent=[-80,22; -72,30]);
piezas.VC_difusora d2(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
annotation (extent=[-72,22; -64,30]);
piezas.VC_difusora d3(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
annotation (extent=[-64,22; -56,30]);
piezas.VC_difusora d4(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
annotation (extent=[-56,22; -48,30]);
piezas.VC_difusora d5(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
annotation (extent=[-48,22; -40,30]);
piezas.VC_difusora d6(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
annotation (extent=[-40,22; -32,30]);
piezas.VC_difusora d7(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)
annotation (extent=[-32,22; -24,30]);
piezas.VC_difusora d8(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)

```

annotation (extent=[-24,22; -16,30]);  
piezas.VC\_difusora d9(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-16,22; -8,30]);  
piezas.VC\_difusora d10(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[-8,22; 0,30]);  
piezas.VC\_difusora d11(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[0,22; 8,30]);  
piezas.VC\_difusora d12(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[8,22; 16,30]);  
piezas.VC\_difusora d13(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[16,22; 24,30]);  
piezas.VC\_difusora d14(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[24,22; 32,30]);  
piezas.VC\_difusora d15(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[32,22; 40,30]);  
piezas.VC\_difusora d16(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[40,22; 48,30]);  
piezas.VC\_difusora d17(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[48,22; 56,30]);  
piezas.VC\_difusora d18(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[56,22; 64,30]);  
piezas.VC\_difusora d19(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[64,22; 72,30]);  
piezas.VC\_difusora d20(No2inicial=0, Nh2inicial=1e-3)  
annotation (extent=[72,22; 80,30]);  
piezas.VC\_anodica a1 annotation (extent=[-80,-4; -72,4]);  
piezas.VC\_anodica a2 annotation (extent=[-72,-4; -64,4]);  
piezas.VC\_anodica a3 annotation (extent=[-64,-4; -56,4]);  
piezas.VC\_anodica a4 annotation (extent=[-56,-4; -48,4]);  
piezas.VC\_anodica a5 annotation (extent=[-48,-4; -40,4]);  
piezas.VC\_anodica a6 annotation (extent=[-40,-4; -32,4]);  
piezas.VC\_anodica a7 annotation (extent=[-32,-4; -24,4]);  
piezas.VC\_anodica a8 annotation (extent=[-24,-4; -16,4]);  
piezas.VC\_anodica a9 annotation (extent=[-16,-4; -8,4]);  
piezas.VC\_anodica a10 annotation (extent=[-8,-4; 0,4]);  
piezas.VC\_anodica a11 annotation (extent=[0,-4; 8,4]);  
piezas.VC\_anodica a12 annotation (extent=[8,-4; 16,4]);  
piezas.VC\_anodica a13 annotation (extent=[16,-4; 24,4]);  
piezas.VC\_anodica a14 annotation (extent=[24,-4; 32,4]);  
piezas.VC\_anodica a15 annotation (extent=[32,-4; 40,4]);  
piezas.VC\_anodica a16 annotation (extent=[40,-4; 48,4]);  
piezas.VC\_anodica a17 annotation (extent=[48,-4; 56,4]);  
piezas.VC\_anodica a18 annotation (extent=[56,-4; 64,4]);  
piezas.VC\_anodica a19 annotation (extent=[64,-4; 72,4]);  
piezas.VC\_anodica a20 annotation (extent=[72,-4; 80,4]);  
piezas.VC\_membrana m1 annotation (extent=[-80,-30; -72,-22]);  
piezas.VC\_membrana m2 annotation (extent=[-72,-30; -64,-22]);  
piezas.VC\_membrana m3 annotation (extent=[-64,-30; -56,-22]);  
piezas.VC\_membrana m4 annotation (extent=[-56,-30; -48,-22]);  
piezas.VC\_membrana m5 annotation (extent=[-48,-30; -40,-22]);

piezas.VC\_membrana m6 annotation (extent=[-40,-30; -32,-22]);  
piezas.VC\_membrana m7 annotation (extent=[-32,-30; -24,-22]);  
piezas.VC\_membrana m8 annotation (extent=[-24,-30; -16,-22]);  
piezas.VC\_membrana m9 annotation (extent=[-16,-30; -8,-22]);  
piezas.VC\_membrana m10 annotation (extent=[-8,-30; 0,-22]);  
piezas.VC\_membrana m11 annotation (extent=[0,-30; 8,-22]);  
piezas.VC\_membrana m12 annotation (extent=[8,-30; 16,-22]);  
piezas.VC\_membrana m13 annotation (extent=[16,-30; 24,-22]);  
piezas.VC\_membrana m14 annotation (extent=[24,-30; 32,-22]);  
piezas.VC\_membrana m15 annotation (extent=[32,-30; 40,-22]);  
piezas.VC\_membrana m16 annotation (extent=[40,-30; 48,-22]);  
piezas.VC\_membrana m17 annotation (extent=[48,-30; 56,-22]);  
piezas.VC\_membrana m18 annotation (extent=[56,-30; 64,-22]);  
piezas.VC\_membrana m19 annotation (extent=[64,-30; 72,-22]);  
piezas.VC\_membrana m20 annotation (extent=[72,-30; 80,-22]);  
piezas.VC\_catalitica c1 annotation (extent=[-80,-56; -72,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c2 annotation (extent=[-72,-56; -64,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c3 annotation (extent=[-64,-56; -56,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c4 annotation (extent=[-56,-56; -48,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c5 annotation (extent=[-48,-56; -40,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c6 annotation (extent=[-40,-56; -32,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c7 annotation (extent=[-32,-56; -24,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c8 annotation (extent=[-24,-56; -16,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c9 annotation (extent=[-16,-56; -8,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c10 annotation (extent=[-8,-56; 0,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c11 annotation (extent=[0,-56; 8,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c12 annotation (extent=[8,-56; 16,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c13 annotation (extent=[16,-56; 24,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c14 annotation (extent=[24,-56; 32,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c15 annotation (extent=[32,-56; 40,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c16 annotation (extent=[40,-56; 48,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c17 annotation (extent=[48,-56; 56,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c18 annotation (extent=[56,-56; 64,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c19 annotation (extent=[64,-56; 72,-48]);  
piezas.VC\_catalitica c20 annotation (extent=[72,-56; 80,-48]);  
piezas.VC\_difusora d21 annotation (extent=[-80,-82; -72,-74]);  
piezas.VC\_difusora d22 annotation (extent=[-72,-82; -64,-74]);  
piezas.VC\_difusora d23 annotation (extent=[-64,-82; -56,-74]);  
piezas.VC\_difusora d24 annotation (extent=[-56,-82; -48,-74]);  
piezas.VC\_difusora d25 annotation (extent=[-48,-82; -40,-74]);  
piezas.VC\_difusora d26 annotation (extent=[-40,-82; -32,-74]);  
piezas.VC\_difusora d27 annotation (extent=[-32,-82; -24,-74]);  
piezas.VC\_difusora d28 annotation (extent=[-24,-82; -16,-74]);  
piezas.VC\_difusora d29 annotation (extent=[-16,-82; -8,-74]);  
piezas.VC\_difusora d30 annotation (extent=[-8,-82; 0,-74]);  
piezas.VC\_difusora d31 annotation (extent=[0,-82; 8,-74]);  
piezas.VC\_difusora d32 annotation (extent=[8,-82; 16,-74]);  
piezas.VC\_difusora d33 annotation (extent=[16,-82; 24,-74]);  
piezas.VC\_difusora d34 annotation (extent=[24,-82; 32,-74]);  
piezas.VC\_difusora d35 annotation (extent=[32,-82; 40,-74]);

piezas.VC\_difusora d36 annotation (extent=[40,-82; 48,-74]);  
piezas.VC\_difusora d37 annotation (extent=[48,-82; 56,-74]);  
piezas.VC\_difusora d38 annotation (extent=[56,-82; 64,-74]);  
piezas.VC\_difusora d39 annotation (extent=[64,-82; 72,-74]);  
piezas.VC\_difusora d40(NUMvc=40) annotation (extent=[72,-82; 80,-74]);  
piezas.TD\_difusora td0(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3,  
  NUMvc=40) annotation (extent=[-84,10; -76,18]);  
piezas.TD\_difusora td1(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-76,10; -68,18]);  
piezas.TD\_difusora td2(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-68,10; -60,18]);  
piezas.TD\_difusora td3(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-60,10; -52,18]);  
piezas.TD\_difusora td4(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-52,10; -44,18]);  
piezas.TD\_difusora td5(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3,  
  NUMvc=40) annotation (extent=[-44,10; -36,18]);  
piezas.TD\_difusora td6(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-36,10; -28,18]);  
piezas.TD\_difusora td7(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
  Do2k=0,  
  Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-28,10; -20,18]);  
piezas.TD\_difusora td8(  
  Do2h2og\_ref=0,  
  Dh2h2og\_ref=2.82e-3,

Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-20,10; -12,18]);  
piezas.TD\_difusora td9(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[-12,10; -4,18]);  
piezas.TD\_difusora td10(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3,  
NUMvc=40) annotation (extent=[-4,10; 4,18]);  
piezas.TD\_difusora td11(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[4,10; 12,18]);  
piezas.TD\_difusora td12(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[12,10; 20,18]);  
piezas.TD\_difusora td13(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[20,10; 28,18]);  
piezas.TD\_difusora td14(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[28,10; 36,18]);  
piezas.TD\_difusora td15(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3,  
NUMvc=40) annotation (extent=[36,10; 44,18]);  
piezas.TD\_difusora td16(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[44,10; 52,18]);  
piezas.TD\_difusora td17(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[52,10; 60,18]);  
piezas.TD\_difusora td18(

Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[60,10; 68,18]);  
piezas.TD\_difusora td19(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[68,10; 76,18]);  
piezas.TD\_difusora td20(  
Do2h2og\_ref=0,  
Dh2h2og\_ref=2.82e-3,  
Do2k=0,  
Dh2k=7.853e-3) annotation (extent=[76,10; 84,18]);  
piezas.TD\_anodica ta1 annotation (extent=[-76,-16; -68,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta2 annotation (extent=[-68,-16; -60,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta3 annotation (extent=[-60,-16; -52,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta4 annotation (extent=[-52,-16; -44,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta5 annotation (extent=[-44,-16; -36,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta6 annotation (extent=[-36,-16; -28,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta7 annotation (extent=[-28,-16; -20,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta8 annotation (extent=[-20,-16; -12,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta9 annotation (extent=[-12,-16; -4,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta10 annotation (extent=[-4,-16; 4,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta11 annotation (extent=[4,-16; 12,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta12 annotation (extent=[12,-16; 20,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta13 annotation (extent=[20,-16; 28,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta14 annotation (extent=[28,-16; 36,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta15 annotation (extent=[36,-16; 44,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta16 annotation (extent=[44,-16; 52,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta17 annotation (extent=[52,-16; 60,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta18 annotation (extent=[60,-16; 68,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta19 annotation (extent=[68,-16; 76,-8]);  
piezas.TD\_anodica ta20 annotation (extent=[76,-16; 84,-8]);  
piezas.TD\_membrana tm1 annotation (extent=[-76,-42; -68,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm2 annotation (extent=[-68,-42; -60,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm3 annotation (extent=[-60,-42; -52,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm4 annotation (extent=[-52,-42; -44,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm5 annotation (extent=[-44,-42; -36,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm6 annotation (extent=[-36,-42; -28,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm7 annotation (extent=[-28,-42; -20,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm8 annotation (extent=[-20,-42; -12,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm9 annotation (extent=[-12,-42; -4,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm10 annotation (extent=[-4,-42; 4,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm11 annotation (extent=[4,-42; 12,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm12 annotation (extent=[12,-42; 20,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm13 annotation (extent=[20,-42; 28,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm14 annotation (extent=[28,-42; 36,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm15 annotation (extent=[36,-42; 44,-34]);  
piezas.TD\_membrana tm16 annotation (extent=[44,-42; 52,-34]);

piezas.TD\_membrana tm17 annotation (extent=[52,-42; 60,-34]);  
 piezas.TD\_membrana tm18 annotation (extent=[60,-42; 68,-34]);  
 piezas.TD\_membrana tm19 annotation (extent=[68,-42; 76,-34]);  
 piezas.TD\_membrana tm20 annotation (extent=[76,-42; 84,-34]);  
 piezas.TD\_catalitica tc1 annotation (extent=[-76,-68; -68,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc2 annotation (extent=[-68,-68; -60,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc3 annotation (extent=[-60,-68; -52,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc4 annotation (extent=[-52,-68; -44,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc5 annotation (extent=[-44,-68; -36,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc6 annotation (extent=[-36,-68; -28,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc7 annotation (extent=[-28,-68; -20,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc8 annotation (extent=[-20,-68; -12,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc9 annotation (extent=[-12,-68; -4,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc10 annotation (extent=[-4,-68; 4,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc11 annotation (extent=[4,-68; 12,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc12 annotation (extent=[12,-68; 20,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc13 annotation (extent=[20,-68; 28,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc14 annotation (extent=[28,-68; 36,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc15 annotation (extent=[36,-68; 44,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc16 annotation (extent=[44,-68; 52,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc17 annotation (extent=[52,-68; 60,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc18 annotation (extent=[60,-68; 68,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc19 annotation (extent=[68,-68; 76,-60]);  
 piezas.TD\_catalitica tc20 annotation (extent=[76,-68; 84,-60]);  
 piezas.TD\_difusora td21 annotation (extent=[-76,-94; -68,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td22 annotation (extent=[-68,-94; -60,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td23 annotation (extent=[-60,-94; -52,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td24 annotation (extent=[-52,-94; -44,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td25 annotation (extent=[-44,-94; -36,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td26 annotation (extent=[-36,-94; -28,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td27 annotation (extent=[-28,-94; -20,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td28 annotation (extent=[-20,-94; -12,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td29 annotation (extent=[-12,-94; -4,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td30 annotation (extent=[-4,-94; 4,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td31 annotation (extent=[4,-94; 12,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td32 annotation (extent=[12,-94; 20,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td33 annotation (extent=[20,-94; 28,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td34 annotation (extent=[28,-94; 36,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td35 annotation (extent=[36,-94; 44,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td36 annotation (extent=[44,-94; 52,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td37 annotation (extent=[52,-94; 60,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td38 annotation (extent=[60,-94; 68,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td39 annotation (extent=[68,-94; 76,-86]);  
 piezas.TD\_difusora td40(NUMvc=40) annotation (extent=[76,-94; 84,-86]);  
 equation  
 connect(terminales.nexo2, td0.nexo1) annotation (points=[-6,54; -6,40;  
 -83.2,40; -83.2,14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(td0.nexo2, d1.nexo1) annotation (points=[-76.8,14; -76,14; -76,  
 22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));  
 connect(d1.nexo1, td1.nexo1) annotation (points=[-76,22.8; -76,14; -75.2,

```
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td1.nexo2, d2.nexo1) annotation (points=[-68.8,14; -68,14; -68,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d2.nexo1, td2.nexo1) annotation (points=[-68,22.8; -68,14; -67.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td2.nexo2, d3.nexo1) annotation (points=[-60.8,14; -60,14; -60,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d3.nexo1, td3.nexo1) annotation (points=[-60,22.8; -60,14; -59.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td3.nexo2, d4.nexo1) annotation (points=[-52.8,14; -52,14; -52,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d4.nexo1, td4.nexo1) annotation (points=[-52,22.8; -52,14; -51.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td4.nexo2, d5.nexo1) annotation (points=[-44.8,14; -44,14; -44,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d5.nexo1, td5.nexo1) annotation (points=[-44,22.8; -44,14; -43.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td5.nexo2, d6.nexo1) annotation (points=[-36.8,14; -36,14; -36,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d6.nexo1, td6.nexo1) annotation (points=[-36,22.8; -36,14; -35.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td6.nexo2, d7.nexo1) annotation (points=[-28.8,14; -28,14; -28,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d7.nexo1, td7.nexo1) annotation (points=[-28,22.8; -28,14; -27.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td7.nexo2, d8.nexo1) annotation (points=[-20.8,14; -20,14; -20,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d8.nexo1, td8.nexo1) annotation (points=[-20,22.8; -20,14; -19.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td8.nexo2, d9.nexo1) annotation (points=[-12.8,14; -12,14; -12,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d9.nexo1, td9.nexo1) annotation (points=[-12,22.8; -12,14; -11.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td9.nexo2, d10.nexo1) annotation (points=[-4.8,14; -4,14; -4,22.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d10.nexo1, td10.nexo1) annotation (points=[-4,22.8; -4,14; -3.2,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td10.nexo2, d11.nexo1) annotation (points=[3.2,14; 4,14; 4,22.8],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d11.nexo1, td11.nexo1) annotation (points=[4,22.8; 4,14; 4.8,14],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td11.nexo2, d12.nexo1) annotation (points=[11.2,14; 12,14; 12,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d12.nexo1, td12.nexo1) annotation (points=[12,22.8; 12,14; 12.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td12.nexo2, d13.nexo1) annotation (points=[19.2,14; 20,14; 20,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d13.nexo1, td13.nexo1) annotation (points=[20,22.8; 20,14; 20.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td13.nexo2, d14.nexo1) annotation (points=[27.2,14; 28,14; 28,
```

```

22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d14.nexo1, td14.nexo1) annotation (points=[28,22.8; 28,14; 28.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td14.nexo2, d15.nexo1) annotation (points=[35.2,14; 36,14; 36,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d15.nexo1, td15.nexo1) annotation (points=[36,22.8; 36,14; 36.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td15.nexo2, d16.nexo1) annotation (points=[43.2,14; 44,14; 44,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d16.nexo1, td16.nexo1) annotation (points=[44,22.8; 44,14; 44.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td16.nexo2, d17.nexo1) annotation (points=[51.2,14; 52,14; 52,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d17.nexo1, td17.nexo1) annotation (points=[52,22.8; 52,14; 52.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td17.nexo2, d18.nexo1) annotation (points=[59.2,14; 60,14; 60,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d18.nexo1, td18.nexo1) annotation (points=[60,22.8; 60,14; 60.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td18.nexo2, d19.nexo1) annotation (points=[67.2,14; 68,14; 68,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d19.nexo1, td19.nexo1) annotation (points=[68,22.8; 68,14; 68.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td19.nexo2, d20.nexo1) annotation (points=[75.2,14; 76,14; 76,
22.8], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d20.nexo1, td20.nexo1) annotation (points=[76,22.8; 76,14; 76.8,
14], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td20.nexo2, a1.nexo1) annotation (points=[83.2,14; 86,14; 86,8;
-84,8; -84,-3.2; -76,-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a1.nexo1, ta1.nexo1) annotation (points=[-76,-3.2; -76,-12; -75.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta1.nexo2, a2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-12; -68,-12; -68,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a2.nexo1, ta2.nexo1) annotation (points=[-68,-3.2; -68,-12; -67.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta2.nexo2, a3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-12; -60,-12; -60,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a3.nexo1, ta3.nexo1) annotation (points=[-60,-3.2; -60,-12; -59.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta3.nexo2, a4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-12; -52,-12; -52,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a4.nexo1, ta4.nexo1) annotation (points=[-52,-3.2; -52,-12; -51.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta4.nexo2, a5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-12; -44,-12; -44,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a5.nexo1, ta5.nexo1) annotation (points=[-44,-3.2; -44,-12; -43.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta5.nexo2, a6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-12; -36,-12; -36,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a6.nexo1, ta6.nexo1) annotation (points=[-36,-3.2; -36,-12; -35.2,

```

```
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta6.nexo2, a7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-12; -28,-12; -28,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a7.nexo1, ta7.nexo1) annotation (points=[-28,-3.2; -28,-12; -27.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta7.nexo2, a8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-12; -20,-12; -20,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a8.nexo1, ta8.nexo1) annotation (points=[-20,-3.2; -20,-12; -19.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta8.nexo2, a9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-12; -12,-12; -12,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a9.nexo1, ta9.nexo1) annotation (points=[-12,-3.2; -12,-12; -11.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta9.nexo2, a10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-12; -4,-12; -4,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a10.nexo1, ta10.nexo1) annotation (points=[-4,-3.2; -4,-12; -3.2,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta10.nexo2, a11.nexo1) annotation (points=[3.2,-12; 4,-12; 4,-3.2],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a11.nexo1, ta11.nexo1) annotation (points=[4,-3.2; 4,-12; 4.8,-12],
style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta11.nexo2, a12.nexo1) annotation (points=[11.2,-12; 12,-12; 12,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a12.nexo1, ta12.nexo1) annotation (points=[12,-3.2; 12,-12; 12.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta12.nexo2, a13.nexo1) annotation (points=[19.2,-12; 20,-12; 20,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a13.nexo1, ta13.nexo1) annotation (points=[20,-3.2; 20,-12; 20.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta13.nexo2, a14.nexo1) annotation (points=[27.2,-12; 28,-12; 28,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a14.nexo1, ta14.nexo1) annotation (points=[28,-3.2; 28,-12; 28.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta14.nexo2, a15.nexo1) annotation (points=[35.2,-12; 36,-12; 36,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a15.nexo1, ta15.nexo1) annotation (points=[36,-3.2; 36,-12; 36.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta15.nexo2, a16.nexo1) annotation (points=[43.2,-12; 44,-12; 44,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a16.nexo1, ta16.nexo1) annotation (points=[44,-3.2; 44,-12; 44.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta16.nexo2, a17.nexo1) annotation (points=[51.2,-12; 52,-12; 52,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a17.nexo1, ta17.nexo1) annotation (points=[52,-3.2; 52,-12; 52.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta17.nexo2, a18.nexo1) annotation (points=[59.2,-12; 60,-12; 60,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a18.nexo1, ta18.nexo1) annotation (points=[60,-3.2; 60,-12; 60.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta18.nexo2, a19.nexo1) annotation (points=[67.2,-12; 68,-12; 68,
```

```

-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a19.nexo1, ta19.nexo1) annotation (points=[68,-3.2; 68,-12; 68.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta19.nexo2, a20.nexo1) annotation (points=[75.2,-12; 76,-12; 76,
-3.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(a20.nexo1, ta20.nexo1) annotation (points=[76,-3.2; 76,-12; 76.8,
-12], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(ta20.nexo2, m1.nexo1) annotation (points=[83.2,-12; 86,-12; 86,
-18; -84,-18; -84,-29.2; -76,-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m1.nexo1, tm1.nexo1) annotation (points=[-76,-29.2; -76,-38;
-75.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm1.nexo2, m2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-38; -68,-38; -68,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m2.nexo1, tm2.nexo1) annotation (points=[-68,-29.2; -68,-38;
-67.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm2.nexo2, m3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-38; -60,-38; -60,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m3.nexo1, tm3.nexo1) annotation (points=[-60,-29.2; -60,-38;
-59.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm3.nexo2, m4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-38; -52,-38; -52,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m4.nexo1, tm4.nexo1) annotation (points=[-52,-29.2; -52,-38;
-51.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm4.nexo2, m5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-38; -44,-38; -44,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m5.nexo1, tm5.nexo1) annotation (points=[-44,-29.2; -44,-38;
-43.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm5.nexo2, m6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-38; -36,-38; -36,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m6.nexo1, tm6.nexo1) annotation (points=[-36,-29.2; -36,-38;
-35.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm6.nexo2, m7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-38; -28,-38; -28,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m7.nexo1, tm7.nexo1) annotation (points=[-28,-29.2; -28,-38;
-27.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm7.nexo2, m8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-38; -20,-38; -20,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m8.nexo1, tm8.nexo1) annotation (points=[-20,-29.2; -20,-38;
-19.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm8.nexo2, m9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-38; -12,-38; -12,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m9.nexo1, tm9.nexo1) annotation (points=[-12,-29.2; -12,-38;
-11.2,-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm9.nexo2, m10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-38; -4,-38; -4,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m10.nexo1, tm10.nexo1) annotation (points=[-4,-29.2; -4,-38; -3.2,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm10.nexo2, m11.nexo1) annotation (points=[3.2,-38; 4,-38; 4,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m11.nexo1, tm11.nexo1) annotation (points=[4,-29.2; 4,-38; 4.8,

```

```
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm11.nexo2, m12.nexo1) annotation (points=[11.2,-38; 12,-38; 12,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m12.nexo1, tm12.nexo1) annotation (points=[12,-29.2; 12,-38; 12.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm12.nexo2, m13.nexo1) annotation (points=[19.2,-38; 20,-38; 20,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m13.nexo1, tm13.nexo1) annotation (points=[20,-29.2; 20,-38; 20.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm13.nexo2, m14.nexo1) annotation (points=[27.2,-38; 28,-38; 28,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m14.nexo1, tm14.nexo1) annotation (points=[28,-29.2; 28,-38; 28.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm14.nexo2, m15.nexo1) annotation (points=[35.2,-38; 36,-38; 36,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m15.nexo1, tm15.nexo1) annotation (points=[36,-29.2; 36,-38; 36.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm15.nexo2, m16.nexo1) annotation (points=[43.2,-38; 44,-38; 44,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m16.nexo1, tm16.nexo1) annotation (points=[44,-29.2; 44,-38; 44.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm16.nexo2, m17.nexo1) annotation (points=[51.2,-38; 52,-38; 52,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m17.nexo1, tm17.nexo1) annotation (points=[52,-29.2; 52,-38; 52.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm17.nexo2, m18.nexo1) annotation (points=[59.2,-38; 60,-38; 60,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m18.nexo1, tm18.nexo1) annotation (points=[60,-29.2; 60,-38; 60.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm18.nexo2, m19.nexo1) annotation (points=[67.2,-38; 68,-38; 68,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m19.nexo1, tm19.nexo1) annotation (points=[68,-29.2; 68,-38; 68.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm19.nexo2, m20.nexo1) annotation (points=[75.2,-38; 76,-38; 76,
-29.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(m20.nexo1, tm20.nexo1) annotation (points=[76,-29.2; 76,-38; 76.8,
-38], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tm20.nexo2, c1.nexo1) annotation (points=[83.2,-38; 86,-38; 86,
-44; -84,-44; -84,-55.2; -76,-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c1.nexo1, tc1.nexo1) annotation (points=[-76,-55.2; -76,-64;
-75.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc1.nexo2, c2.nexo1) annotation (points=[-68.8,-64; -68,-64; -68,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c2.nexo1, tc2.nexo1) annotation (points=[-68,-55.2; -68,-64;
-67.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc2.nexo2, c3.nexo1) annotation (points=[-60.8,-64; -60,-64; -60,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c3.nexo1, tc3.nexo1) annotation (points=[-60,-55.2; -60,-64;
-59.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc3.nexo2, c4.nexo1) annotation (points=[-52.8,-64; -52,-64; -52,
```

```

-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c4.nexo1, tc4.nexo1) annotation (points=[-52,-55.2; -52,-64;
-51.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc4.nexo2, c5.nexo1) annotation (points=[-44.8,-64; -44,-64; -44,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c5.nexo1, tc5.nexo1) annotation (points=[-44,-55.2; -44,-64;
-43.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc5.nexo2, c6.nexo1) annotation (points=[-36.8,-64; -36,-64; -36,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c6.nexo1, tc6.nexo1) annotation (points=[-36,-55.2; -36,-64;
-35.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc6.nexo2, c7.nexo1) annotation (points=[-28.8,-64; -28,-64; -28,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c7.nexo1, tc7.nexo1) annotation (points=[-28,-55.2; -28,-64;
-27.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc7.nexo2, c8.nexo1) annotation (points=[-20.8,-64; -20,-64; -20,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c8.nexo1, tc8.nexo1) annotation (points=[-20,-55.2; -20,-64;
-19.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc8.nexo2, c9.nexo1) annotation (points=[-12.8,-64; -12,-64; -12,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c9.nexo1, tc9.nexo1) annotation (points=[-12,-55.2; -12,-64;
-11.2,-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc9.nexo2, c10.nexo1) annotation (points=[-4.8,-64; -4,-64; -4,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c10.nexo1, tc10.nexo1) annotation (points=[-4,-55.2; -4,-64; -3.2,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc10.nexo2, c11.nexo1) annotation (points=[3.2,-64; 4,-64; 4,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c11.nexo1, tc11.nexo1) annotation (points=[4,-55.2; 4,-64; 4.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc11.nexo2, c12.nexo1) annotation (points=[11.2,-64; 12,-64; 12,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c12.nexo1, tc12.nexo1) annotation (points=[12,-55.2; 12,-64; 12.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc12.nexo2, c13.nexo1) annotation (points=[19.2,-64; 20,-64; 20,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c13.nexo1, tc13.nexo1) annotation (points=[20,-55.2; 20,-64; 20.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc13.nexo2, c14.nexo1) annotation (points=[27.2,-64; 28,-64; 28,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c14.nexo1, tc14.nexo1) annotation (points=[28,-55.2; 28,-64; 28.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc14.nexo2, c15.nexo1) annotation (points=[35.2,-64; 36,-64; 36,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c15.nexo1, tc15.nexo1) annotation (points=[36,-55.2; 36,-64; 36.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc15.nexo2, c16.nexo1) annotation (points=[43.2,-64; 44,-64; 44,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c16.nexo1, tc16.nexo1) annotation (points=[44,-55.2; 44,-64; 44.8,

```

```
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc16.nexo2, c17.nexo1) annotation (points=[51.2,-64; 52,-64; 52,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c17.nexo1, tc17.nexo1) annotation (points=[52,-55.2; 52,-64; 52.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc17.nexo2, c18.nexo1) annotation (points=[59.2,-64; 60,-64; 60,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c18.nexo1, tc18.nexo1) annotation (points=[60,-55.2; 60,-64; 60.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc18.nexo2, c19.nexo1) annotation (points=[67.2,-64; 68,-64; 68,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c19.nexo1, tc19.nexo1) annotation (points=[68,-55.2; 68,-64; 68.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc19.nexo2, c20.nexo1) annotation (points=[75.2,-64; 76,-64; 76,
-55.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(c20.nexo1, tc20.nexo1) annotation (points=[76,-55.2; 76,-64; 76.8,
-64], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(tc20.nexo2, d21.nexo1) annotation (points=[83.2,-64; 86,-64; 86,
-70; -84,-70; -84,-81.2; -76,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d21.nexo1, td21.nexo1) annotation (points=[-76,-81.2; -76,-90;
-75.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td21.nexo2, d22.nexo1) annotation (points=[-68.8,-90; -68,-90;
-68,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d22.nexo1, td22.nexo1) annotation (points=[-68,-81.2; -68,-90;
-67.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td22.nexo2, d23.nexo1) annotation (points=[-60.8,-90; -60,-90;
-60,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d23.nexo1, td23.nexo1) annotation (points=[-60,-81.2; -60,-90;
-59.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td23.nexo2, d24.nexo1) annotation (points=[-52.8,-90; -52,-90;
-52,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d24.nexo1, td24.nexo1) annotation (points=[-52,-81.2; -52,-90;
-51.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td24.nexo2, d25.nexo1) annotation (points=[-44.8,-90; -44,-90;
-44,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d25.nexo1, td25.nexo1) annotation (points=[-44,-81.2; -44,-90;
-43.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td25.nexo2, d26.nexo1) annotation (points=[-36.8,-90; -36,-90;
-36,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d26.nexo1, td26.nexo1) annotation (points=[-36,-81.2; -36,-90;
-35.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td26.nexo2, d27.nexo1) annotation (points=[-28.8,-90; -28,-90;
-28,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d27.nexo1, td27.nexo1) annotation (points=[-28,-81.2; -28,-90;
-27.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td27.nexo2, d28.nexo1) annotation (points=[-20.8,-90; -20,-90;
-20,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d28.nexo1, td28.nexo1) annotation (points=[-20,-81.2; -20,-90;
-19.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td28.nexo2, d29.nexo1) annotation (points=[-12.8,-90; -12,-90;
```

```

-12,-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d29.nexo1, td29.nexo1) annotation (points=[-12,-81.2; -12,-90;
-11.2,-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td29.nexo2, d30.nexo1) annotation (points=[-4.8,-90; -4,-90; -4,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d30.nexo1, td30.nexo1) annotation (points=[-4,-81.2; -4,-90; -3.2,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td30.nexo2, d31.nexo1) annotation (points=[3.2,-90; 4,-90; 4,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d31.nexo1, td31.nexo1) annotation (points=[4,-81.2; 4,-90; 4.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td31.nexo2, d32.nexo1) annotation (points=[11.2,-90; 12,-90; 12,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d32.nexo1, td32.nexo1) annotation (points=[12,-81.2; 12,-90; 12.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td32.nexo2, d33.nexo1) annotation (points=[19.2,-90; 20,-90; 20,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d33.nexo1, td33.nexo1) annotation (points=[20,-81.2; 20,-90; 20.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td33.nexo2, d34.nexo1) annotation (points=[27.2,-90; 28,-90; 28,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d34.nexo1, td34.nexo1) annotation (points=[28,-81.2; 28,-90; 28.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td34.nexo2, d35.nexo1) annotation (points=[35.2,-90; 36,-90; 36,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d35.nexo1, td35.nexo1) annotation (points=[36,-81.2; 36,-90; 36.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td35.nexo2, d36.nexo1) annotation (points=[43.2,-90; 44,-90; 44,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d36.nexo1, td36.nexo1) annotation (points=[44,-81.2; 44,-90; 44.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td36.nexo2, d37.nexo1) annotation (points=[51.2,-90; 52,-90; 52,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d37.nexo1, td37.nexo1) annotation (points=[52,-81.2; 52,-90; 52.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td37.nexo2, d38.nexo1) annotation (points=[59.2,-90; 60,-90; 60,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d38.nexo1, td38.nexo1) annotation (points=[60,-81.2; 60,-90; 60.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td38.nexo2, d39.nexo1) annotation (points=[67.2,-90; 68,-90; 68,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d39.nexo1, td39.nexo1) annotation (points=[68,-81.2; 68,-90; 68.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td39.nexo2, d40.nexo1) annotation (points=[75.2,-90; 76,-90; 76,
-81.2], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(d40.nexo1, td40.nexo1) annotation (points=[76,-81.2; 76,-90; 76.8,
-90], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(td40.nexo2, terminales.nexo1) annotation (points=[83.2,-90; 92,
-90; 92,40; 6,40; 6,54], style(color=0, rgbcolor={0,0,0}));
connect(terminales.pin_negativo1, ground.p) annotation (points=[-6,66;

```

```

-34,66], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, corriente_polarizacion.pin_negativo1) annotation (
  points=[-34,66; -38,66; -38,89; -7,89], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255}));
connect(terminales.pin_positivo1, corriente_polarizacion.pin_positivo1)
  annotation (points=[6,66; 38,66; 38,89; 7,89], style(color=1, rgbcolor=
    {255,0,0}));
end pila_PEM_polarizacion_lineal;
end celula_combustible_PEM;

```

```

package ejercicios
model polarizacion_variable_original
  "Modelo completamente montado de la pila"

```

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,

```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-100,
    StopTime=250,
    NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_lineal
    pila_PEM_polarizacion_lineal annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_original;

```

```

model polarizacion_variable_original2
    "Modelo completamente montado de la pila"

```

```

annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170})),
    Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
        color=0,

```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-100,
    StopTime=250,
    NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_escalones
pila_PEM_polarizacion_escalones annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_original2;

```

model curva\_potencia "Modelo completamente montado de la pila"

annotation (Diagram, Icon(

```

Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255})),
Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=30,
  rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=44,
  rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),

```

```

Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
experiment(
  StartTime=-100,
  StopTime=250,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_lineal
pila_PEM_polarizacion_lineal annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end curva_potencia;

```

```

model polarizacion_variable_Tafel
annotation (Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[40,-80; 40,20], style(

```

```

    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(StartTime=-50, StopTime=250),
experimentSetupOutput);

```

```

parameter unidades.ElectricPotential Tafel_anodo=0.02
"Pendiente de Tafel del ánodo";
parameter unidades.ElectricPotential Tafel_catodo=0.04
"Pendiente de Tafel del cátodo";

```

```

celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_lineal
pila_PEM_polarizacion_lineal(
a1(B=Tafel_anodo),
a2(B=Tafel_anodo),
a3(B=Tafel_anodo),
a4(B=Tafel_anodo),
a5(B=Tafel_anodo),
a6(B=Tafel_anodo),
a7(B=Tafel_anodo),
a8(B=Tafel_anodo),
a9(B=Tafel_anodo),
a10(B=Tafel_anodo),
a11(B=Tafel_anodo),
a12(B=Tafel_anodo),
a13(B=Tafel_anodo),
a14(B=Tafel_anodo),
a15(B=Tafel_anodo),
a16(B=Tafel_anodo),
a17(B=Tafel_anodo),
a18(B=Tafel_anodo),
a19(B=Tafel_anodo),

```

```

a20(B=Tafel_anodo),
c1(B=Tafel_catodo),
c2(B=Tafel_catodo),
c3(B=Tafel_catodo),
c4(B=Tafel_catodo),
c5(B=Tafel_catodo),
c6(B=Tafel_catodo),
c7(B=Tafel_catodo),
c8(B=Tafel_catodo),
c9(B=Tafel_catodo),
c10(B=Tafel_catodo),
c11(B=Tafel_catodo),
c12(B=Tafel_catodo),
c13(B=Tafel_catodo),
c14(B=Tafel_catodo),
c15(B=Tafel_catodo),
c16(B=Tafel_catodo),
c17(B=Tafel_catodo),
c18(B=Tafel_catodo),
c19(B=Tafel_catodo),
c20(B=Tafel_catodo)) annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_Tafel;

```

```

model polarizacion_variable_area_activa

```

```

annotation (Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},

```

```

    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(StartTime=-50, StopTime=250),
experimentSetupOutput);

```

parameter unidades2.densidad\_generacion\_electrica generacion\_anodo=1.2

"Densidad de generación eléctrica del ánodo";

parameter unidades2.densidad\_generacion\_electrica generacion\_catodo=1.2

"Densidad de generación eléctrica del cátodo";

celula\_combustible\_PEM.pila\_PEM\_polarizacion\_lineal

```

pila_PEM_polarizacion_lineal(
a1(AactI0ref=generacion_anodo),
a2(AactI0ref=generacion_anodo),
a3(AactI0ref=generacion_anodo),
a4(AactI0ref=generacion_anodo),
a5(AactI0ref=generacion_anodo),
a6(AactI0ref=generacion_anodo),
a7(AactI0ref=generacion_anodo),
a8(AactI0ref=generacion_anodo),
a9(AactI0ref=generacion_anodo),

```

```

a10(AactI0ref=generacion_anodo),
a11(AactI0ref=generacion_anodo),
a12(AactI0ref=generacion_anodo),
a13(AactI0ref=generacion_anodo),
a14(AactI0ref=generacion_anodo),
a15(AactI0ref=generacion_anodo),
a16(AactI0ref=generacion_anodo),
a17(AactI0ref=generacion_anodo),
a18(AactI0ref=generacion_anodo),
a19(AactI0ref=generacion_anodo),
a20(AactI0ref=generacion_anodo),
c1(AactI0ref=generacion_catodo),
c2(AactI0ref=generacion_catodo),
c3(AactI0ref=generacion_catodo),
c4(AactI0ref=generacion_catodo),
c5(AactI0ref=generacion_catodo),
c6(AactI0ref=generacion_catodo),
c7(AactI0ref=generacion_catodo),
c8(AactI0ref=generacion_catodo),
c9(AactI0ref=generacion_catodo),
c10(AactI0ref=generacion_catodo),
c11(AactI0ref=generacion_catodo),
c12(AactI0ref=generacion_catodo),
c13(AactI0ref=generacion_catodo),
c14(AactI0ref=generacion_catodo),
c15(AactI0ref=generacion_catodo),
c16(AactI0ref=generacion_catodo),
c17(AactI0ref=generacion_catodo),
c18(AactI0ref=generacion_catodo),
c19(AactI0ref=generacion_catodo),
c20(AactI0ref=generacion_catodo))
      annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_area_activa;

model polarizacion_variable_hidratacion
  "Modelo completamente montado de la pila"

  parameter unidades.Pressure Pvapor( displayUnit="Pa")=40000
    "Presión de vapor en el colector";

  annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=30,

```

```

    rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=44,
  rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=250,
  NumberOfIntervals=1000),

```

```

experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_lineal
  pila_PEM_polarizacion_lineal(
    terminales(Ph2og=Pvapor))
  annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_hidratacion;

model polarizacion_variable_hidratacion2
  "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades.Pressure Pvapor( displayUnit="Pa")=40000
  "Presión de vapor en el colector";

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},

```

```

    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-50,
    StopTime=950,
    NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(Ph2og=Pvapor))
    annotation (extent=[-60,-80; 60,60]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=0.002)
    annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-70,40; -50,60]);
equation
    connect(resistor.n, pila_PEM.pin_positivo) annotation (points=[10,80; 42,
        80; 42,39], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
    connect(resistor.p, ground.p) annotation (points=[-10,80; -60,80; -60,60],
        style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
    connect(ground.p, pila_PEM.pin_negativo) annotation (points=[-60,60; -42,
        60; -42,39], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
end polarizacion_variable_hidratacion2;

model polarizacion_variable_refrigeracion
    "Modelo completamente montado de la pila"

    parameter unidades.Temp_K temperatura=323 "Temperatura del refrigerante"; //
    Equivale aproximadamente a un octavo de litro por segundo.
    parameter unidades2.Fneto flujo=5e-3 "Flujo molar del refrigerante";

    annotation (Diagram, Icon(
        Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
            color=0,
            rgbcolor={0,0,0},

```

```

    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),

```

```

Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=250,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_lineal
pila_PEM_polarizacion_lineal(terminales(flujo_refrigerante=flujo, T=
  temperatura)) annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_refrigeracion;

```

```

model polarizacion_variable_refrigeracion2
  "Modelo completamente montado de la pila"

```

```

parameter unidades.Temp_K temperatura=323 "Temperatura del refrigerante";
parameter unidades2.Fneto flujo=5e-3 "Flujo molar del refrigerante";

```

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,

```

```

    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=950,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(flujo_refrigerante=flujo,
T=
  temperatura))
  annotation (extent=[-60,-80; 60,60]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=0.002)
  annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-70,40; -50,60]);
equation
connect(resistor.n, pila_PEM.pin_positivo) annotation (points=[10,80; 42,
  80; 42,39], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(resistor.p, ground.p) annotation (points=[-10,80; -60,80; -60,60],
  style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, pila_PEM.pin_negativo) annotation (points=[-60,60; -42,
  60; -42,39], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
end polarizacion_variable_refrigeracion2;

model polarizacion_variable_presiones
  "Modelo completamente montado de la pila"

  parameter unidades.Pressure presion_oxigeno( displayUnit="Pa")=1e5

```

"Presión de oxígeno";  
parameter unidades.Pressure presion\_hidrogeno( displayUnit="Pa")=1e5  
"Presión de hidrógeno";

annotation (Diagram, Icon(  
Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=68,  
rgbfillColor={170,213,255})),  
Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=30,  
rgbfillColor={215,215,215})),  
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=44,  
rgbfillColor={255,170,170})),  
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=68,  
rgbfillColor={170,213,255},  
fillPattern=1)),  
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=68,  
rgbfillColor={170,213,255},  
fillPattern=1)),  
Line(points=[0,-80; 0,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=68,  
rgbfillColor={170,213,255},  
fillPattern=1)),  
Line(points=[40,-80; 40,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=68,  
rgbfillColor={170,213,255},  
fillPattern=1)),  
Line(points=[60,-80; 60,20], style(  
color=0,  
rgbcolor={0,0,0},  
fillColor=68,  
rgbfillColor={170,213,255},  
fillPattern=1)),

```

Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-10,
  StopTime=300,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_lineal
pila_PEM_polarizacion_lineal(terminales(presion_o2=presion_oxigeno,
presion_h2=presion_hidrogeno)) annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end polarizacion_variable_presiones;

```

model encharcamiento\_original "Modelo completamente montado de la pila"

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),

```

```

Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=300,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_escalones
pila_PEM_polarizacion_escalones annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end encharcamiento_original;

model encharcamiento_original_largo "Modelo completamente montado de la pila"

```

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),

```

```

Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=44,
  rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=300,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);

```

```

celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM
  annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
piezas.resistencia_polarizacion3 resistencia_polarizacion3_1
  annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-40,56; -20,76]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,42; -42,
  76; -30,76], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistencia_polarizacion3_1.pin_negativo1) annotation (
  points=[-30,76; -30,81; -7,81], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo, resistencia_polarizacion3_1.pin_positivo1)
  annotation (points=[42,42; 42,81; 7,81], style(color=1, rgbcolor={255,0,
    0}));
end encharcamiento_original_largo;

model encharcamiento_solovatacion "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades2.solovatacion solovatacion=5;

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,

```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-50,
    StopTime=300,
    NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_escalones
pila_PEM_polarizacion_escalones(
ta1(S=solvatacion),
ta2(S=solvatacion),
ta3(S=solvatacion),
ta4(S=solvatacion),
ta5(S=solvatacion),
ta6(S=solvatacion),
ta7(S=solvatacion),
ta8(S=solvatacion),
ta9(S=solvatacion),
ta10(S=solvatacion),
ta11(S=solvatacion),
ta12(S=solvatacion),
ta13(S=solvatacion),
ta14(S=solvatacion),
ta15(S=solvatacion),
ta16(S=solvatacion),
ta17(S=solvatacion),

```

```
ta18(S=solvatacion),
ta19(S=solvatacion),
ta20(S=solvatacion),
tm1(S=solvatacion),
tm2(S=solvatacion),
tm3(S=solvatacion),
tm4(S=solvatacion),
tm5(S=solvatacion),
tm6(S=solvatacion),
tm7(S=solvatacion),
tm8(S=solvatacion),
tm9(S=solvatacion),
tm10(S=solvatacion),
tm11(S=solvatacion),
tm12(S=solvatacion),
tm13(S=solvatacion),
tm14(S=solvatacion),
tm15(S=solvatacion),
tm16(S=solvatacion),
tm17(S=solvatacion),
tm18(S=solvatacion),
tm19(S=solvatacion),
tm20(S=solvatacion),
tc1(S=solvatacion),
tc2(S=solvatacion),
tc3(S=solvatacion),
tc4(S=solvatacion),
tc5(S=solvatacion),
tc6(S=solvatacion),
tc7(S=solvatacion),
tc8(S=solvatacion),
tc9(S=solvatacion),
tc10(S=solvatacion),
tc11(S=solvatacion),
tc12(S=solvatacion),
tc13(S=solvatacion),
tc14(S=solvatacion),
tc15(S=solvatacion),
tc16(S=solvatacion),
tc17(S=solvatacion),
tc18(S=solvatacion),
tc19(S=solvatacion),
tc20(S=solvatacion)) annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end encharcamiento_solvatacion;
```

```
model encharcamiento_hidratacion "Modelo completamente montado de la pila"
```

```
parameter unidades.Pressure presion=40000 "Presión de vapor";
```

```
annotation (Diagram, Icon(
```

```

Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255})),
Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=30,
  rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=44,
  rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),

```

```

Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
experiment(
  StartTime=-10,
  StopTime=300,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM_polarizacion_escalones
pila_PEM_polarizacion_escalones(terminales(Ph2og=presion))
annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
end encharcamiento_hidratacion;

```

model encharcamiento\_refrigeracion "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades2.Fneto flujo=5e-3;//Flujo molar de aire refrigerante, equivale a un octavo de litro por segundo aproximadamente

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,

```

```

    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-50,
    StopTime=1100,
    NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(flujo_refrigerante=
    flujo)) annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
piezas.resistencia_polarizacion3 resistencia_polarizacion3_1
    annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-40,54; -20,74]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
    74; -30,74], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistencia_polarizacion3_1.pin_negativo1) annotation (
    points=[-30,74; -30,81; -7,81], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo, resistencia_polarizacion3_1.pin_positivo1)
    annotation (points=[42,25; 42,81; 7,81], style(color=1, rgbcolor={255,0,
    0}));
end encharcamiento_refrigeracion;

model encharcamiento_carga "Modelo completamente montado de la pila"
    annotation (Diagram, Icon(

```

```

Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255})),
Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=30,
  rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=44,
  rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),

```

```

Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=1000,
  NumberOfIntervals=1000),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM
  annotation (extent=[-60,-60; 60,60]);
piezas.resistencia_polarizacion3 resistencia_polarizacion2_1
  annotation (extent=[-10,68; 10,88]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-34,54; -14,74]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,42; -42,
  74; -24,74], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistencia_polarizacion2_1.pin_negativo1) annotation (
  points=[-24,74; -24,79; -7,79], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo, resistencia_polarizacion2_1.pin_positivo1)
  annotation (points=[42,42; 40,42; 40,79; 7,79], style(color=1, rgbcolor=
    {255,0,0}));
end encharcamiento_carga;

```

model defecto\_masa\_original "Modelo completamente montado de la pila"

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),

```

```

Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-10,
  StopTime=25,
  NumberOfIntervals=100),
experimentSetupOutput);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistencia_polarizacion2_1(R=
  0.00050)
  annotation (extent=[0,70; 20,90], rotation=0);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-30,60; -10,80]);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM
  annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
  80; -20,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistencia_polarizacion2_1.p)

```

```
    annotation (points=[-20,80; 0,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo, resistencia_polarizacion2_1.n) annotation (
    points=[42,25; 42,80; 20,80], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end defecto_masa_original;
```

```
model defecto_masa_hidratacion "Modelo completamente montado de la pila"
```

```
parameter unidades.Pressure presion=40000 "Presión de vapor";
```

```
annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170})),
    Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[0,-80; 0,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[40,-80; 40,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[60,-80; 60,20], style(
```

```

    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-10,
    StopTime=25,
    NumberOfIntervals=100),
experimentSetupOutput);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistencia_polarizacion2_1(R=
    0.00050)
    annotation (extent=[0,70; 20,90], rotation=180);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(Ph2og=presion))
    annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-30,60; -10,80]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
    80; -20,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistencia_polarizacion2_1.n)
    annotation (points=[-20,80; 0,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo, resistencia_polarizacion2_1.p) annotation (
    points=[42,25; 42,80; 20,80], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end defecto_masa_hidratacion;

model defecto_masa_refrigeracion "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades2.Fneto F_dis=5e-3 "Flujo de refrigerante";

annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,

```

```

    rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=44,
  rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-10,
  StopTime=25,
  NumberOfIntervals=100),

```

```

    experimentSetupOutput);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistencia_polarizacion2_1(R=
    0.00050)
    annotation (extent=[0,70; 20,90], rotation=180);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(flujo_refrigerante=
    F_dis))
    annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-30,60; -10,80]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo,ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
    80; -20,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p,resistencia_polarizacion2_1.n)
    annotation (points=[-20,80; 0,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo,resistencia_polarizacion2_1.p) annotation (
    points=[42,25; 42,80; 20,80], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end defecto_masa_refrigeracion;

```

model defecto\_masa\_carga "Modelo completamente montado de la pila"

```

parameter Modelica.SIunits.Resistance resistencia=0.00050
    "impedancia de carga";

```

```

annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=30,
        rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=44,
        rgbfillColor={255,170,170})),
    Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},
        fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},
        fillColor=68,
        rgbfillColor={170,213,255},

```

```

    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-10,
  StopTime=25,
  NumberOfIntervals=100),
experimentSetupOutput);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistencia_polarizacion2_1(R=
  resistencia)
  annotation (extent=[0,70; 20,90], rotation=180);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM
  annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-30,60; -10,80]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo,ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
  80; -20,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p,resistencia_polarizacion2_1.n)
  annotation (points=[-20,80; 0,80], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(pila_PEM.pin_positivo,resistencia_polarizacion2_1.p) annotation (
  points=[42,25; 42,80; 20,80], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end defecto_masa_carga;

```

model PPM\_refrigeracion "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades.Pressure F\_ref=5e-3 "Flujo del refrigerante";

```
annotation (Diagram, Icon(  
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=68,  
    rgbfillColor={170,213,255})),  
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=30,  
    rgbfillColor={215,215,215})),  
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=44,  
    rgbfillColor={255,170,170})),  
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=68,  
    rgbfillColor={170,213,255},  
    fillPattern=1)),  
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=68,  
    rgbfillColor={170,213,255},  
    fillPattern=1)),  
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=68,  
    rgbfillColor={170,213,255},  
    fillPattern=1)),  
  Line(points=[40,-80; 40,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=68,  
    rgbfillColor={170,213,255},  
    fillPattern=1)),  
  Line(points=[60,-80; 60,20], style(  
    color=0,  
    rgbcolor={0,0,0},  
    fillColor=68,  
    rgbfillColor={170,213,255},  
    fillPattern=1)),
```

```

Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54]),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=2000,
  NumberOfIntervals=2050),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(flujo_refrigerante=
  F_ref)) annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
piezas.corriente_polarizacion2 corriente_polarizacion2_1
  annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-40,40; -20,60]);
equation
  connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
    60; -30,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
  connect(ground.p, corriente_polarizacion2_1.pin_negativo1) annotation (
    points=[-30,60; -30,81; -7,81], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
  connect(pila_PEM.pin_positivo, corriente_polarizacion2_1.pin_positivo1)
    annotation (points=[42,25; 42,81; 7,81], style(color=1, rgbcolor={255,0,
    0}));
end PPM_refrigeracion;

model temperatura_refrigeracion "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades.Pressure F_ref=5e-3 "Flujo del refrigerante";

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,

```

```

    rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=2000,
  NumberOfIntervals=2050),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(flujo_refrigerante=
  F_ref)) annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-40,40; -20,60]);

```

```

Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=0.007)
  annotation (extent=[0,50; 20,70]);
equation
  connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
    60; -30,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
  connect(ground.p, resistor.p)
    annotation (points=[-30,60; 0,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
  connect(resistor.n, pila_PEM.pin_positivo) annotation (points=[20,60; 42,
    60; 42,25], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end temperatura_refrigeracion;

```

```

model PPM_humectacion "Modelo completamente montado de la pila"

```

```

  parameter unidades.Pressure Presion( displayUnit="Pa")=40000;

```

```

  annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255})),
    Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=30,
      rgbfillColor={215,215,215})),
    Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=44,
      rgbfillColor={255,170,170})),
    Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[0,-80; 0,20], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      fillColor=68,
      rgbfillColor={170,213,255},
      fillPattern=1)),
    Line(points=[40,-80; 40,20], style(

```

```

    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-50,
    StopTime=2000,
    NumberOfIntervals=2050),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(Ph2og=Presion))
    annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
piezas.corriente_polarizacion2 corriente_polarizacion2_1
    annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-40,40; -20,60]);
equation
    connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
        60; -30,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
    connect(ground.p, corriente_polarizacion2_1.pin_negativo1) annotation (
        points=[-30,60; -30,81; -7,81], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
    connect(pila_PEM.pin_positivo, corriente_polarizacion2_1.pin_positivo1)
        annotation (points=[42,25; 42,81; 7,81], style(color=1, rgbcolor={255,0,
            0}));
end PPM_humectacion;

model temperatura_humectacion "Modelo completamente montado de la pila"

parameter unidades.Pressure Presion( displayUnit="Pa")=40000;

annotation (Diagram, Icon(
    Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
        color=0,
        rgbcolor={0,0,0},

```

```

    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),

```

```

Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=2000,
  NumberOfIntervals=2050),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(Ph2og=Presion))
  annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-40,40; -20,60]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=0.007)
  annotation (extent=[0,50; 20,70]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
  60; -30,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistor.p)
  annotation (points=[-30,60; 0,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(resistor.n, pila_PEM.pin_positivo) annotation (points=[20,60; 42,
  60; 42,25], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end temperatura_humectacion;

```

model PPM\_presiones "Modelo completamente montado de la pila"

```

parameter unidades.Pressure Presion_hidrogeno( displayUnit="Pa")=1e5;
parameter unidades.Pressure Presion_oxigeno( displayUnit="Pa")=1e5;

```

```

annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(

```

```

    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[60,-80; 60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
    255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
    StartTime=-50,
    StopTime=2000,
    NumberOfIntervals=2050),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(presion_o2=
    Presion_oxigeno, presion_h2=Presion_hidrogeno))
    annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
piezas.corriente_polarizacion2 corriente_polarizacion2_1
    annotation (extent=[-10,70; 10,90]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
    annotation (extent=[-40,40; -20,60]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
    60; -30,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, corriente_polarizacion2_1.pin_negativo1) annotation (
    points=[-30,60; -30,81; -7,81], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));

```

```
connect(pila_PEM.pin_positivo, corriente_polarizacion2_1.pin_positivo1)
  annotation (points=[42,25; 42,81; 7,81], style(color=1, rgbcolor={255,0,
    0}));
end PPM_presiones;
```

```
model temperatura_presiones "Modelo completamente montado de la pila"
```

```
parameter unidades.Pressure Presion_hidrogeno( displayUnit="Pa")=1e5;
parameter unidades.Pressure Presion_oxigeno( displayUnit="Pa")=1e5;
```

```
annotation (Diagram, Icon(
  Rectangle(extent=[-80,-80; -20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255})),
  Rectangle(extent=[-20,-80; 20,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=30,
    rgbfillColor={215,215,215})),
  Rectangle(extent=[20,-80; 80,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=44,
    rgbfillColor={255,170,170})),
  Line(points=[-60,-80; -60,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[-40,-80; -40,-78; -40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[0,-80; 0,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
  Line(points=[40,-80; 40,20], style(
    color=0,
    rgbcolor={0,0,0},
    fillColor=68,
    rgbfillColor={170,213,255},
    fillPattern=1)),
```

```

Line(points=[60,-80; 60,20], style(
  color=0,
  rgbcolor={0,0,0},
  fillColor=68,
  rgbfillColor={170,213,255},
  fillPattern=1)),
Line(points=[-92,70; -92,-30; -80,-30], style(color=3, rgbcolor={0,0,
  255})),
Line(points=[80,-30; 90,-30; 90,70], style(color=3, rgbcolor={0,0,255})),
Rectangle(extent=[-20,80; 20,60]),
Line(points=[-92,70; -20,70]),
Line(points=[20,70; 90,70]),
Line(points=[-72,54; -48,54]),
Line(points=[-66,50; -54,50]),
Line(points=[-62,46; -58,46]),
Line(points=[-60,70; -60,54])),
experiment(
  StartTime=-50,
  StopTime=2000,
  NumberOfIntervals=2050),
experimentSetupOutput);
celula_combustible_PEM.pila_PEM pila_PEM(terminales(presion_o2=
  Presion_oxigeno, presion_h2=Presion_hidrogeno))
  annotation (extent=[-60,-60; 60,40]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground
  annotation (extent=[-40,40; -20,60]);
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=0.007)
  annotation (extent=[0,50; 20,70]);
equation
connect(pila_PEM.pin_negativo, ground.p) annotation (points=[-42,25; -42,
  60; -30,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(ground.p, resistor.p)
  annotation (points=[-30,60; 0,60], style(color=3, rgbcolor={0,0,255}));
connect(resistor.n, pila_PEM.pin_positivo) annotation (points=[20,60; 42,
  60; 42,25], style(color=1, rgbcolor={255,0,0}));
end temperatura_presiones;
end ejercicios;
end Celula_PEM_3;

```

# Anexo B

## Extensiones de cálculo

---

### Ecuación (2.19), ecuación de Butler-Volmer desarrollada

La ecuación de Butler-Volmer en su forma inicial es la siguiente.

$$I = A_{\text{act}} I_0^{\text{ref}} \left( e^{\left(\frac{\alpha_a \eta F}{RT}\right) (E-E_0)} - e^{\left(\frac{\alpha_c \eta F}{RT}\right) (E-E_0)} \right)$$

Esta ecuación se puede simplificar y escribir de una forma más compacta del siguiente modo. Primero hay que considerar que estamos en el cátodo, de modo que el término anódico se hace igual a 1, ya que  $\alpha_a = 0$  y  $\alpha_c = 1$ .

En segundo lugar renombramos los términos de corriente, pendiente de Tafel y sobrepotencial de activación.

$$B = \frac{RT}{\alpha_c \eta F}$$
$$E_{\text{act}} = E - E_0$$
$$I = G_e$$

La ecuación de la forma que viene a continuación se denomina a veces ecuación de Tafel.

$$G_e = -A_{\text{act}} I_0^{\text{ref}} \left( e^{\left(\frac{E_{\text{act}}}{B}\right)} - 1 \right) \text{ (reacción catódica pura)}$$

$$G_e = -A_{\text{act}} I_0^{\text{ref}} \left( -e^{\left(\frac{E_{\text{act}}}{B}\right)} + 1 \right) \text{ (reacción anódica pura)}$$

Lo que interesa en nuestro modelo es conocer el sobrepotencial a partir de la corriente generada en cada volumen de control. Despejemos pues  $E_{\text{act}}$ .

$$E_{\text{act}} = B \text{ LOG} \left[ 1 - \frac{G_e}{A_{\text{act}} I_0^{\text{ref}}} \right] \quad (1)$$

Ésta será la expresión que usaremos para calcular el sobrepotencial catódico de activación en función de la corriente generada en cada volumen de control.

La expresión (1) sirve para el cátodo y el ánodo puesto que las corrientes generadas en el cátodo tienen signo contrario a las del ánodo. Si la generación eléctrica en el cátodo se considera negativa, en el ánodo será positiva. Por lo tanto si cambia el signo de la generación, podemos cambiar el signo de la ecuación anódica pura quedando igual que la catódica pura.

Debo recordar, aunque se explica en 2.2.3. que la generación de la corriente se supone homogéneamente distribuida por toda la capa catalítica.

También hay que comentar que el término entre paréntesis de (1) es siempre positivo, pues la generación eléctrica es negativa en los volúmenes de control, a resultas de ser una corriente que sale del volumen. Entonces el sobrepotencial será siempre positivo, siendo lo que significa un sobrepotencial tal, que se opone al potencial termodinámico de la célula galvánica.

## Ecuación (2.20), sobrepotencial de concentración

Había que desarrollar una ecuación que se ajustase a un tipo de sobrepotencial con forma de término exponencial, y que reflejase las pérdidas de concentración en la célula.

Debo recordar que en este modelo las pérdidas de concentración engloban a los efectos de encharcamiento y defecto de masa. El concepto es crear una expresión en función de la presión de oxígeno, pero podemos incluir los efectos del encharcamiento si consideramos que en los poros el agua líquida reduce la superficie de intercambio, de modo que podemos considerar no tanto la presión de oxígeno, como otra presión reducida por los efectos del encharcamiento.

$$P_{xO_2} = (1 - \chi_{rel}) P_{O_2}$$

$$E_{O_2} = \begin{cases} \frac{1}{A} \left( C_1 e^{\left( \left( \frac{P_{O_2}^0}{P_{XO_2} - P_{inf}} \right) - C_2 \right)} - C_3 \right) & \forall P_{XO_2} > P_{corte} \\ \frac{1}{A} \left( C_1 e^{\left( \left( \frac{P_{O_2}^0}{P_{corte} - P_{inf}} \right) - C_2 \right)} - C_3 \right) & \forall P_{XO_2} \leq P_{corte} \end{cases} \quad (2)$$

La ecuación está inspirada en [4]. El significado de sus parámetros es el siguiente.

$C_1 = C_3$  y regulan la dureza de la respuesta ante una subpresión de oxígeno.

$C_2$  Ajusta la respuesta para que a la presión  $P_{O_2}$  el sobrepotencial sea cero o el valor pequeño que deseemos.

$P_{inf}$  Es la presión en la que se encuentra la asíntota de la exponencial. Su posición determina si la influencia de este sobrepotencial comienza con una subpresión mayor o menor. Ese valor no se alcanza por la forma en la que hemos definido (2).

$P_{corte}$  Es la presión a la que el sobrepotencial generado es igual que el potencial termodinámico. No tiene sentido un sobrepotencial mayor, por lo que por debajo de esa presión el sobrepotencial es constante.

$\frac{1}{A}$  Es una ganancia que ajusta el rango máximo de valores del sobrepotencial de concentración, al potencial termodinámico.

## Ecuación (3.5), explicación de la entropía del agua

Estamos en especial interesados en conocer la variación de entropía del proceso de evaporación del agua. La entropía no se suele ofrecer con sus valores absolutos sino relativos. Por ejemplo para el agua el hidrógeno y el oxígeno se suele dar un valor a temperatura ambiente que presupone que a 0°C la entropía es también  $0 \left( \frac{J}{^\circ K \text{ mol}} \right)$

Pero para saber la entropía a otras temperaturas y en otros estados hay que aplicar la definición de entropía.

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Partiendo de la base de que a cero grados la entropía es cero, primero calentamos el agua desde cero hasta 100°C, con lo que el cambio de entropía es:

$$dS = m C_p \frac{dT}{T}$$

El numerador es el fruto de la conversión del calor en un calentamiento a presión constante. Si ahora integramos esta expresión y partimos de la entropía cero a cero grados, sabremos el aumento de entropía hasta los cien grados.

$$\Delta S = m C_p \text{Log} \left[ \frac{T_f}{T_i} \right]$$

Si la masa de un mol de agua son  $18 \left( \frac{g}{\text{mol}} \right)$ , su calor específico  $C_p = 4.18 \left( \frac{J}{g \text{ } ^\circ K} \right)$ ,  $T_i = 273 \text{ (} ^\circ K \text{)}$  y  $T_f = 373 \text{ (} ^\circ K \text{)}$ , el aumento de entropía molar desde cero hasta cien grados es:

$$\Delta S \text{ (0 } ^\circ C \rightarrow 100 \text{ } ^\circ C) = 18 \left( \frac{g}{\text{mol}} \right) 4.18 \left( \frac{J}{g \text{ } ^\circ K} \right) \text{Log} \left[ \frac{373 \text{ (} ^\circ K \text{)}}{273 \text{ (} ^\circ K \text{)}} \right] = 23.5 \left( \frac{J}{^\circ K \text{ mol}} \right)$$

Ahora se produce la evaporación, como la temperatura es constante a partir de la definición de entropía tenemos que:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = m \frac{L_v}{T}$$

Sabiendo que la masa de un mol de agua son  $18\left(\frac{g}{mol}\right)$  y la latencia de vaporización son  $L_v = 2257\left(\frac{J}{g}\right)$ , la entropía molar de vaporización es:

$$\Delta S = 18 \left( \frac{g}{mol} \right) \frac{2257 \left( \frac{J}{g} \right)}{373 \text{ (}^\circ K)} = 108.9 \left( \frac{J}{^\circ K mol} \right)$$

Pero si la evaporación se hubiese producido a otra temperatura como a  $298(^\circ K)$

$$\Delta S = 18 \left( \frac{g}{mol} \right) \frac{2257 \left( \frac{J}{g} \right)}{298 \text{ (}^\circ K)} = 121.2 \left( \frac{J}{^\circ K mol} \right)$$

Este último será el valor que utilice en los cálculos puesto que las otras entropías creo que están calculadas a esa temperatura. Se pueden usar estas fórmulas para corregir la entropía del agua pero en todo caso yo emplearé tan sólo la corrección de la entropía de vaporización calculada a  $298(^\circ K)$ .

### Ecuación (3.16), la temperatura de la mezcla

Si dado un volumen de sustancia a temperatura  $T_{in}$  y con calor específico  $C_{pin}$ , ahora introducimos una pequeña cantidad de otra sustancia a temperatura  $T_{ex}$  y calor específico  $C_{pex}$ , la temperatura de la mezcla  $T_f$  viene dada por el balance energético.

$$Q_{ex} = -Q_{in}$$

$$C_{pex} M_{ex} (T_f - T_{ex}) = C_{pin} M_{in} (T_{in} - T_f)$$

$$T_f = \frac{C_{pin} M_{in} T_{in} + C_{pex} T_{ex} M_{ex}}{C_{pex} M_{ex} + C_{pin} M_{in}}$$

Como entra un flujo másico  $F_m$ , la cantidad de masa que entra en un instante  $\Delta t$  es  $F_m \Delta t$ . Sustituyendo esto donde pone  $M_{ex}$  tenemos la expresión que buscamos.

$$T_f = \frac{C_{pin} M_{in} T_{in} + C_{pex} T_{ex} F_m \Delta t}{C_{pex} F_m \Delta t + C_{pin} M_{in}}$$