

WHITE PAPER

Diseño de sistemas de pila de combustible utilizando el diseño en el nivel de sistema

Modelado y simulación en Simulink y Simscape

En este white paper se describe el uso de Simulink® y Simscape™ para diseñar y simular un sistema de pila de combustible para movilidad eléctrica. Mediante ejemplos, se mostrará cómo Simulink y Simscape permiten realizar:

- Modelado físico multidominio y simulaciones de sistemas de pila de combustible, incluidos sistemas térmicos, de gases y de líquidos.
- Diferentes niveles de fidelidad de modelado.

Durante décadas, las pilas de combustible se han utilizado para alimentar diversas aplicaciones. Un ejemplo del uso de las pilas de combustible es el programa espacial de los EE. UU. En la actualidad, las pilas de combustible de hidrógeno se consideran uno de los elementos básicos de la transición de movilidad ecológica.

Aunque se trata de una tecnología probada y madura que se viene utilizando desde hace mucho tiempo, la implementación de pilas de combustible como fuentes de energía para la movilidad eléctrica plantea varios desafíos, tales como los efectos sobre la eficiencia y la autonomía de un vehículo.

El sistema de propulsión de vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) consta de muchos componentes de diferentes dominios de ingeniería, tales como eléctrico, de control, mecánico, termodinámico e incluso químico, para gestionar la difusión de gases a través de la membrana de la pila de combustible. El diseño de estos componentes, individualmente y en conjunto, afecta al rendimiento del vehículo. Modelar y optimizar los diseños permite probar una mayor variedad de condiciones, acortar los plazos de desarrollo y reducir los costes.

En este white paper se describe el diseño y la parametrización de un modelo de pila de combustible y sus sistemas de soporte (balance-of-plant) con Simscape. El modelo emplea un bloque de conjunto membrana electrodo (MEA) personalizado `FuelCell.ssc` suministrado con Simscape Fluids™, así como un dominio de mezcla de gases personalizado y diseñado específicamente para modelar pilas de combustible.

Se basa en una pila de combustible de membrana de electrolito polimérico (PEM), que es el tipo de pila de combustible más frecuente en aplicaciones de movilidad debido a su baja temperatura de funcionamiento, baja presión y alta eficiencia. Asimismo, el modelo contiene los componentes de balance-of-plant.

¿Por qué utilizar modelos de pilas de combustible?

Emplear modelos de pilas de combustible en lugar de prototipos tradicionales tiene numerosas ventajas en todas las etapas de diseño. Puede comparar variantes de diseño, realizar estudios de tradeoff, y seleccionar y dimensionar los componentes para lograr el rendimiento deseado. Una vez creado el modelo inicial, puede optimizar los parámetros e identificar las mejores estrategias de funcionamiento.

Usos de los modelos de pilas de combustible

Los modelos de pilas de combustible se utilizan de muchas formas para:

- Seleccionar y dimensionar componentes
 - Realizar estudios de tradeoff utilizando diferentes variantes de diseño
 - Optimizar parámetros y estrategias de funcionamiento
- Diseñar y validar algoritmos de control
 - Gestionar la temperatura y la humedad
 - Controlar la presión
- Analizar el rendimiento
 - Analizar los flujos de energía entre las baterías y las pilas de combustible
 - Determinar la autonomía de vehículos FCEV utilizando perfiles de conducción

Entre las ventajas de la simulación se encuentran las siguientes:

- Plazos de desarrollo más cortos
- Mayor variedad de condiciones probadas
- Reducción del coste de las pruebas

Además, estos modelos permiten diseñar y validar algoritmos y lógica de control junto con el sistema, incluso antes de que el hardware esté disponible. Puede comenzar con un modelo simplificado y madurar las estrategias de control junto con el sistema en general.

Cuando el diseño del sistema esté completo y validado, puede implementar los componentes utilizando la generación de código. MATLAB®, Simulink y Stateflow ofrecen prestaciones para generar código C/C++, HDL y de texto estructurado que se puede ejecutar en cualquier procesador, FPGA o PLC. Concretamente para aplicaciones de automoción, las funcionalidades de generación de código también incluyen soporte para flujos de trabajo conformes con AUTOSAR.

Utilizar modelos de simulación permite explorar una mayor variedad de condiciones de funcionamiento de las pilas de combustible, incluidas aquellas que no sean prácticas o seguras cuando se utilizan prototipos de hardware. También puede analizar el rendimiento general del sistema de pila de combustible; por ejemplo, determinar los flujos de energía entre las baterías y las pilas de combustible, y estimar la autonomía de vehículos FCEV. La información obtenida de la simulación ayuda a desarrollar mejores prototipos de hardware, lo que mejora la eficacia y reduce el coste de las pruebas.

Definición del modelo de pila de combustible

Los modelos de Simscape capturan el comportamiento de sistemas de pila de combustible completos, incluidas las características termodinámicas y de difusión detalladas de los gases mezclados, así como en el dominio térmico y líquido, para gestionar la temperatura y la humidificación.

El siguiente modelo (Figura 1) utiliza una librería personalizada y un dominio de Simscape personalizado para modelado de mezcla de gases. El conjunto membrana electrodo es un componente personalizado diseñado con código de Simscape que se puede adaptar para cumplir con requisitos específicos.

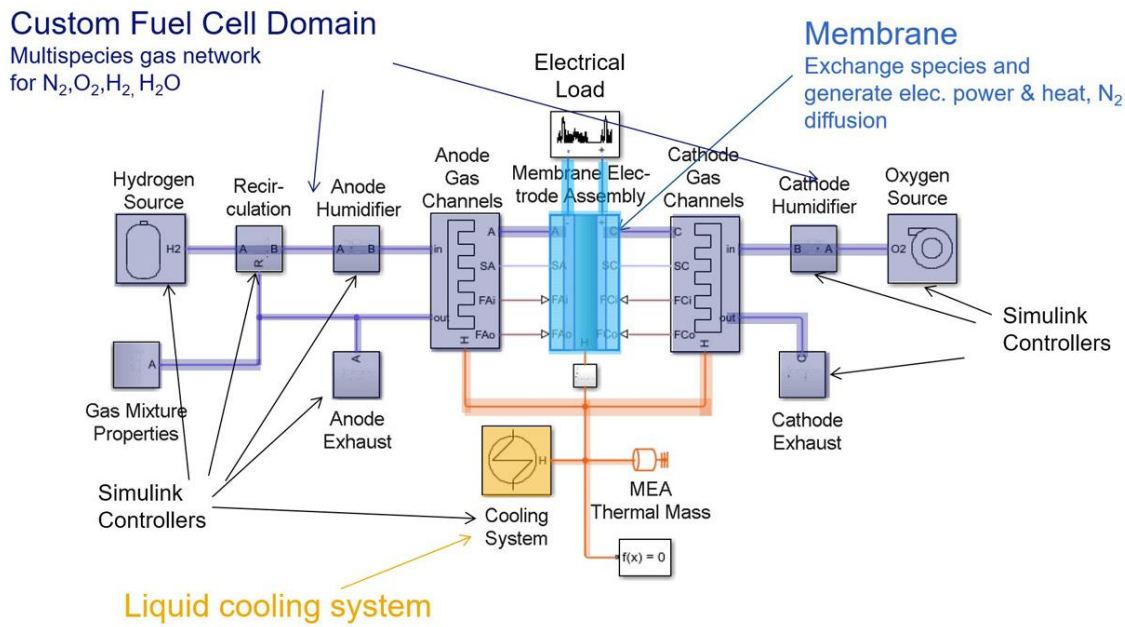


Figura 1. Sistema de pila de combustible que utiliza un dominio de pila de combustible personalizado que incluye el modelo de membrana.

Para obtener más información, consulte este ejemplo: [Sistema de pila de combustible PEM](#).

Las secciones resaltadas en color violeta representan el dominio de pila de combustible personalizado. Se ocupa de los aspectos especialmente complejos de los sistemas de pila de combustible, que surgen porque son redes de mezcla de gases. Es necesario tener en cuenta las características termodinámicas y de fluidos de una mezcla de cuatro especies de gases distintas: nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2) y agua (H_2O).

La membrana, resaltada en azul, está escrita en lenguaje de Simscape, que trataremos brevemente en la parte final de este documento. El modelo de membrana calcula el comportamiento eléctrico utilizando la ley de Faraday, la ecuación de Nernst y la conexión de la membrana a la carga eléctrica alimentada por la pila. Sus propiedades también tienen en cuenta la difusión del nitrógeno, una capacidad fundamental para diseñar estrategias de purga, que a su vez son necesarias para optimizar la eficiencia y la producción de energía y determinar el tamaño que requiere la batería.

El sistema de gestión térmica se indica en color naranja. La pila de combustible debe funcionar a $80\text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente; genera calor residual, de modo que para el balance-of-plant es necesario realizar una gestión térmica empleando refrigeradores, intercambiadores de calor, bombas y calentadores para arranque en frío.

Muchos de los componentes del sistema de pila de combustible requieren diferentes tipos de controladores, como se indica en la Figura 1.

Componentes del modelo de pila de combustible

Simscape ofrece opciones para modelar pilas de combustible con diferentes niveles de fidelidad. En una sección posterior se explica cómo seleccionar un nivel de fidelidad apropiado. Los componentes individuales de diferentes dominios de ingeniería, junto con sus respectivos controladores, se pueden modelar con precisión.

Los componentes básicos de la pila de combustible son:

- Fuente de hidrógeno
- Sistema de recirculación
- Humidificador
- Ánodo
- Sistema de escape y purga

Fuente de hidrógeno

La fuente de hidrógeno consta de un depósito de combustible, una válvula reductora de presión y una tubería (Figura 2). El depósito constituye una cámara de volumen constante, un concepto que se utiliza en todo el modelo. La Figura 2 también muestra la lista de parámetros del bloque del depósito. Dado que en el depósito solo se almacena hidrógeno, en la fracción molar inicial (recuadro rojo) que abarca las cuatro especies se ha establecido el valor 1 solo para la tercera especie, el hidrógeno. El orden fijo de las especies es nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y agua. Ese vector aparece en todo el proceso de modelado.

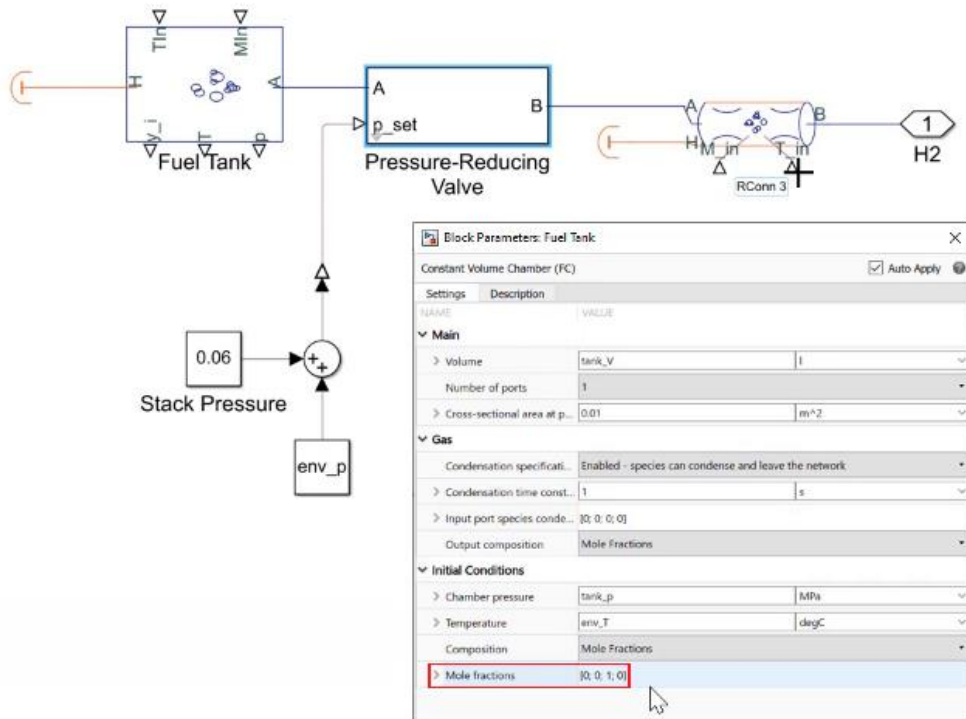


Figura 2. Depósito con válvula reductora de presión y controlador.

El depósito recibe flujo másico externo (M_{in}) a una determinada temperatura (T_{in}). Cuenta con un puerto de conexión térmica (H, izquierda), que en este caso está aislado, y un puerto (A) que lo conecta a la siguiente unidad, la válvula reductora de presión. Además, el depósito tiene salidas de medición para presión (p) y temperatura (T), y para las fracciones molares (y_i) de las cuatro especies abarcadas. La válvula conectada reduce la presión del hidrógeno del depósito, que es de aproximadamente 700 bares, a los 1,6 bares que requiere la pila de combustible. El puerto B de la válvula está unido a un elemento de tubería que tiene entradas de flujo másico (M_{in}) y de temperatura (T_{in}), y un puerto térmico, que no se utilizan aquí.

Recirculación

La recirculación (Figura 3) se modela porque no todo el hidrógeno se utiliza en el ánodo. El hidrógeno no utilizado se recircula, en lugar de emitirse al medio ambiente. El elemento de recirculación es una cámara de volumen constante con tres puertos. Conectado al puerto B se encuentra un inyector con un controlador que regula el flujo procedente de (R) hacia el puerto (B) de la cámara de volumen en función de la corriente utilizada por la carga eléctrica de la pila (i_{stack} , parte inferior izquierda).

El modelo de la recirculación permite comprobar cómo se ve afectada la eficiencia cuando se altera la proporción de hidrógeno nuevo y gas usado que refluye desde el ánodo.

En una sección posterior, se explica cómo la simulación con Simulink y Simscape ayuda a validar el diseño y los controladores. Puede explorar el espacio de diseño a fondo antes de realizar prototipado de un sistema con hardware.

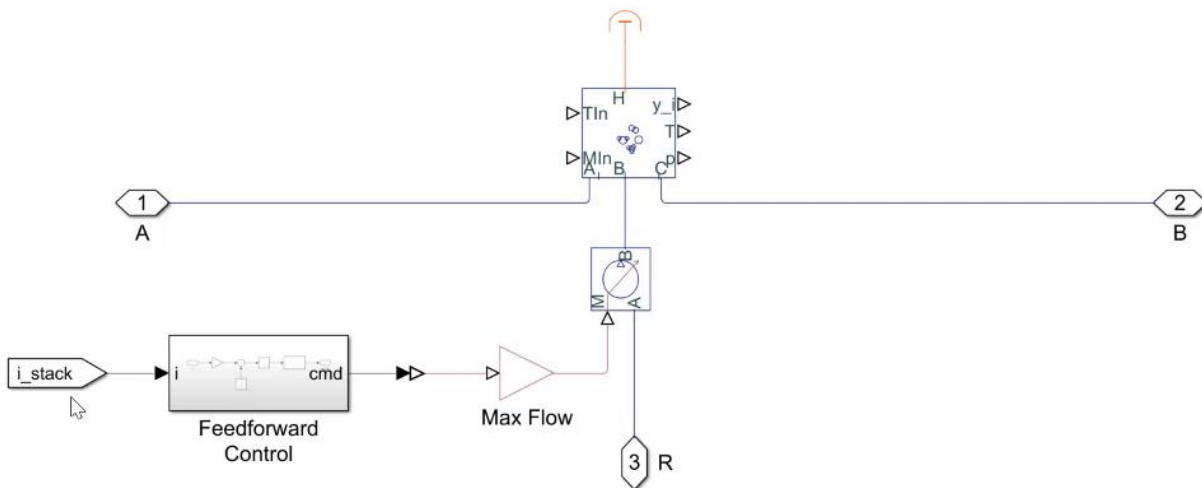


Figura 3. Recirculación con controlador y válvula.

Humidificador

El humidificador del ánodo está conectado al puerto (B) del sistema de recirculación (Figura 4). La membrana debe mantenerse húmeda durante el funcionamiento, de lo contrario, se dañará. Para lograrlo, el humidificador mantiene la humedad relativa de la mezcla de gases que entra en el ánodo al 100 por ciento inyectando vapor de agua en la tubería sobre M_{in} .

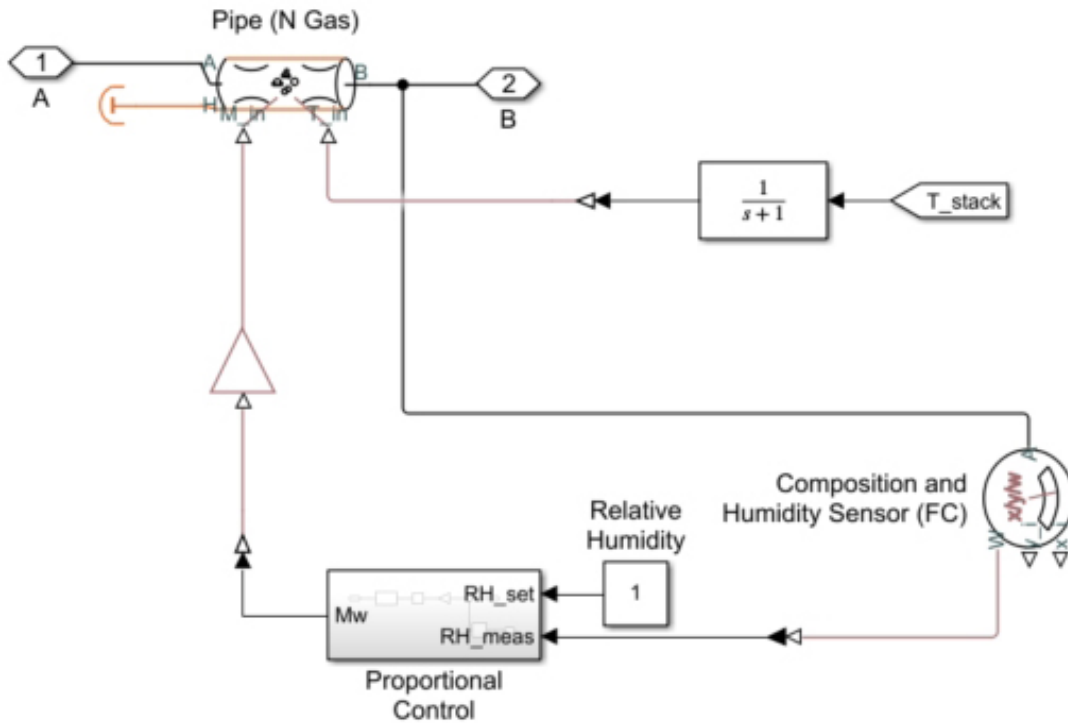


Figura 4. Elemento humidificador que incluye un sensor de composición y humedad en la membrana.

El sensor de composición y humedad, conectado a la membrana, mide continuamente las fracciones másica (x_i) y molar (y_i) de todos los componentes, y el controlador proporcional agrega agua a la mezcla según sea necesario. Además del flujo másico (M_{in}), una función de transferencia (parte superior derecha) determina la temperatura del vapor de agua agregado a partir de la temperatura actual de la pila.

Ánodo

Dentro del ánodo (Figura 5), el hidrógeno se divide en protones y electrones que químicamente es una oxidación. Los protones pasan al cátodo a través de la membrana. Los electrones fluyen a través de un circuito eléctrico externo y generan la corriente eléctrica que alimenta la carga conectada.

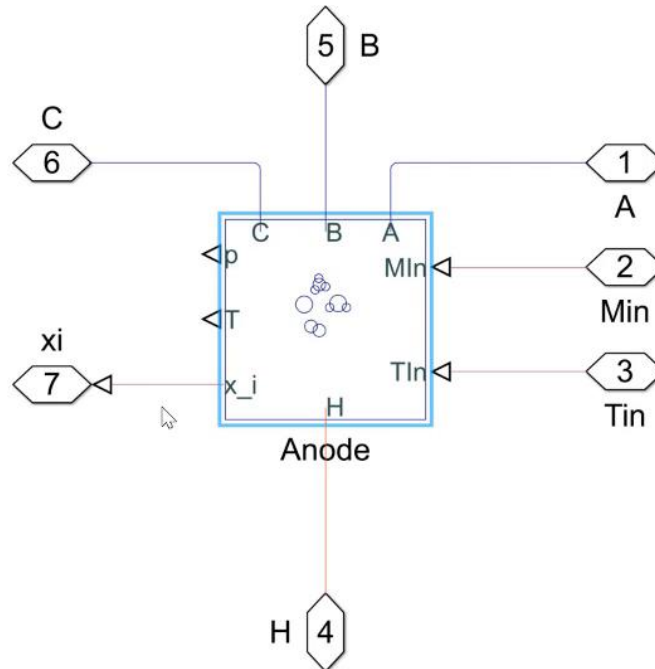


Figura 5. Subsistema de canales de gas del ánodo.

El ánodo, también modelado como una cámara de volumen constante, tiene una entrada en el puerto (C), y una salida de gas por el puerto (B). El puerto (A) se utiliza para leer la temperatura y la presión de la membrana; no existe flujo sobre este elemento. El flujo procedente de la membrana se controla con los puertos (Min) y (Tin). El puerto (H) intercambia calor con el sistema de refrigeración/calefacción. El puerto (x_i) sirve para obtener las fracciones másicas de cada uno de los componentes gaseosos.

Sistema de escape y purga

Durante el funcionamiento, nitrógeno, protones y agua pasan a través de la membrana de la pila de combustible. El nitrógeno se acumula en el ánodo y reduce el uso de hidrógeno como combustible, lo que provoca una disminución de la producción de energía. Para mitigar este efecto, el sistema de pila de combustible emplea un escape en el ánodo para purgar el sistema.

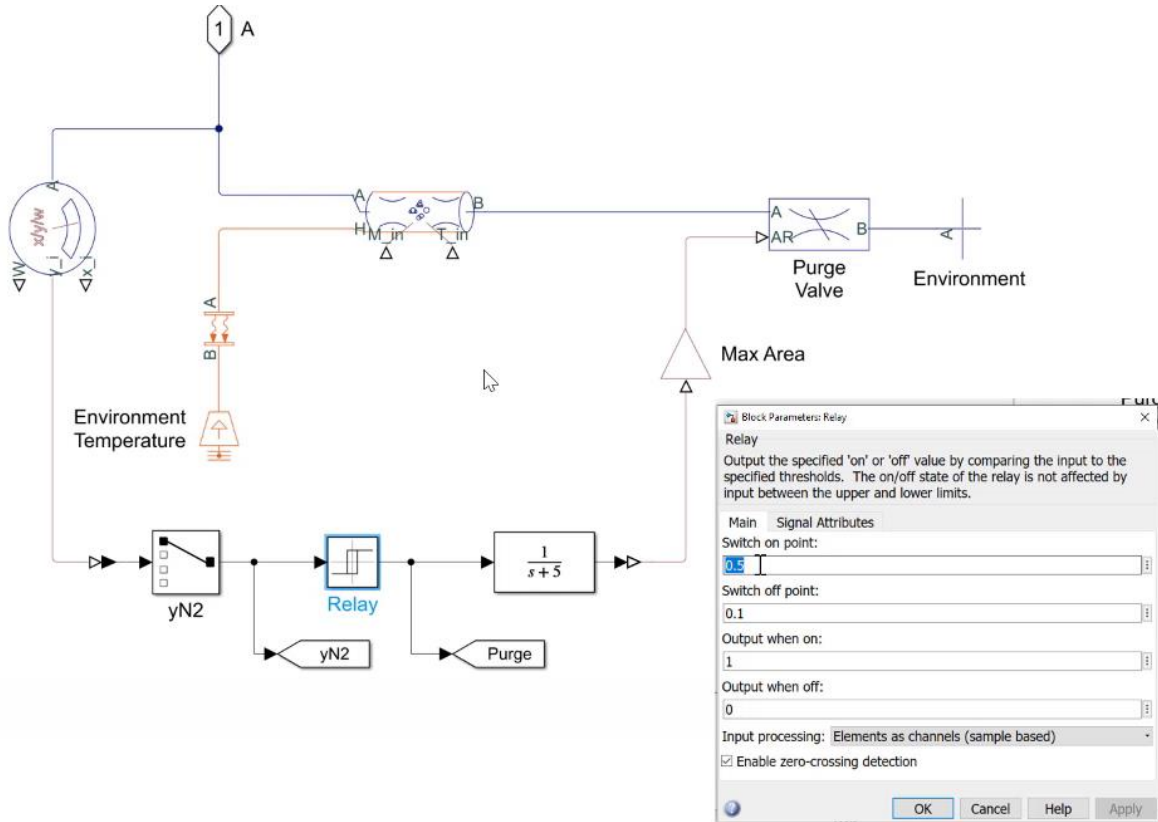


Figura 6. Escape del ánodo con relé de purga.

En este ejemplo, un relé purgará el reflujó en cuanto el nivel de nitrógeno alcance un valor de fracción molar de 0,5 (punto de activación en los parámetros del bloque del relé, Figura 6) y se detendrá cuando el valor sea 0,1 (punto de desactivación en los parámetros del bloque del relé). Mientras la purga esté activada, la válvula de purga estará completamente abierta. Mientras esté desactivada, estará completamente cerrada.

Validación de estrategias de controladores: ejemplo de purga

Puede utilizar Simscape para validar el funcionamiento de controladores de un sistema. Simscape registra las salidas de todos los bloques durante las simulaciones. Las salidas se pueden inspeccionar en Simscape Results Explorer (Figura 7).

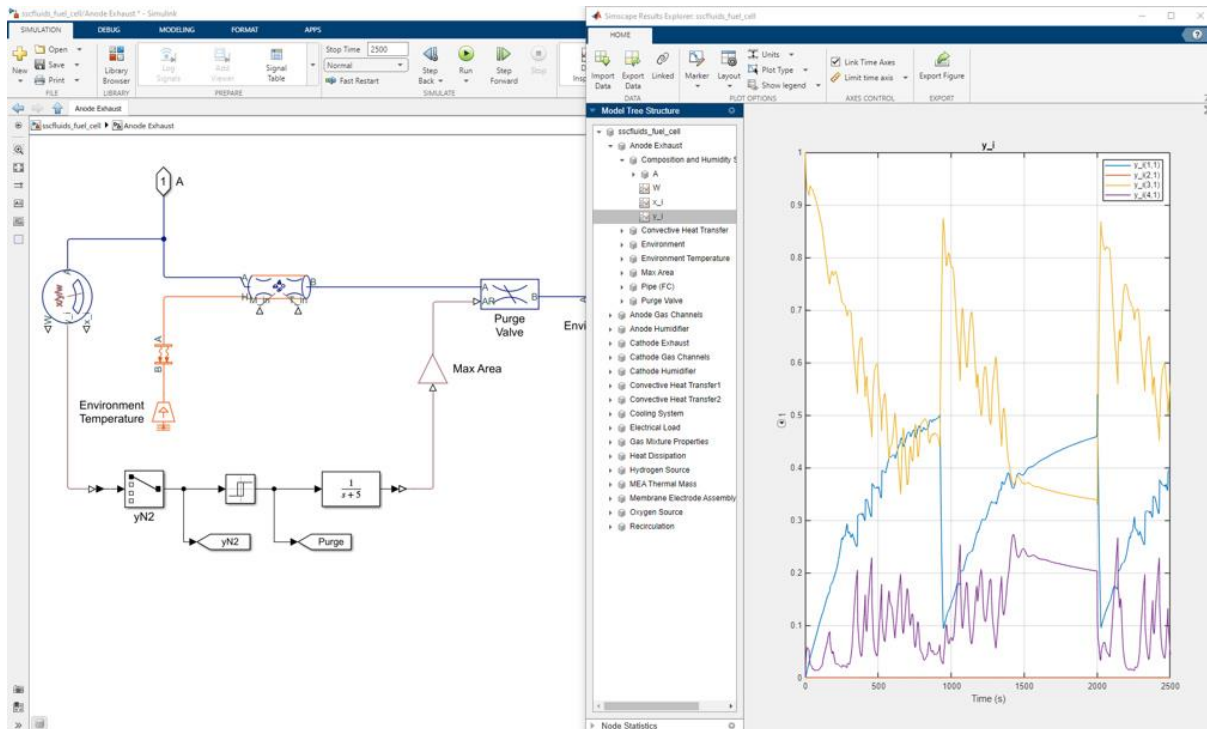


Figura 7. Elemento de purga (izquierda) con resultados de simulación en Simscape Results Explorer.

La figura muestra las fracciones molares (y_i) de las especies de gases en el puerto (A) del sensor de composición y humedad del sistema de escape del ánodo durante el funcionamiento. Al principio, el nivel de nitrógeno (línea azul) es cero. A medida que el nivel de nitrógeno aumenta, la fracción de hidrógeno (línea amarilla) disminuye. Cuando la fracción de nitrógeno alcanza 0,5, el proceso de purga comienza, y se detiene cuando llega a 0,1, de acuerdo con lo deseado.

Al mismo tiempo, la fracción de agua (línea violeta) varía debido al control del humidificador. Por último, la fracción de oxígeno (línea naranja) permanece en cero, como era de esperarse, ya que el oxígeno y el hidrógeno no se deben juntar en el mismo lado de la pila. Los resultados de la simulación permiten comprobar visualmente si la estrategia de purga funciona y sirven para validar el controlador.

Entrada de aire

El bloque del cátodo (que no se muestra en la figura) tiene el mismo aspecto que el ánodo que aparece en la Figura 5, y cuenta con los mismos puertos y entradas. En su interior, el oxígeno, como reactivo, acepta los electrones que fluyen a través del circuito eléctrico externo y reacciona con los protones de la membrana, formando agua.

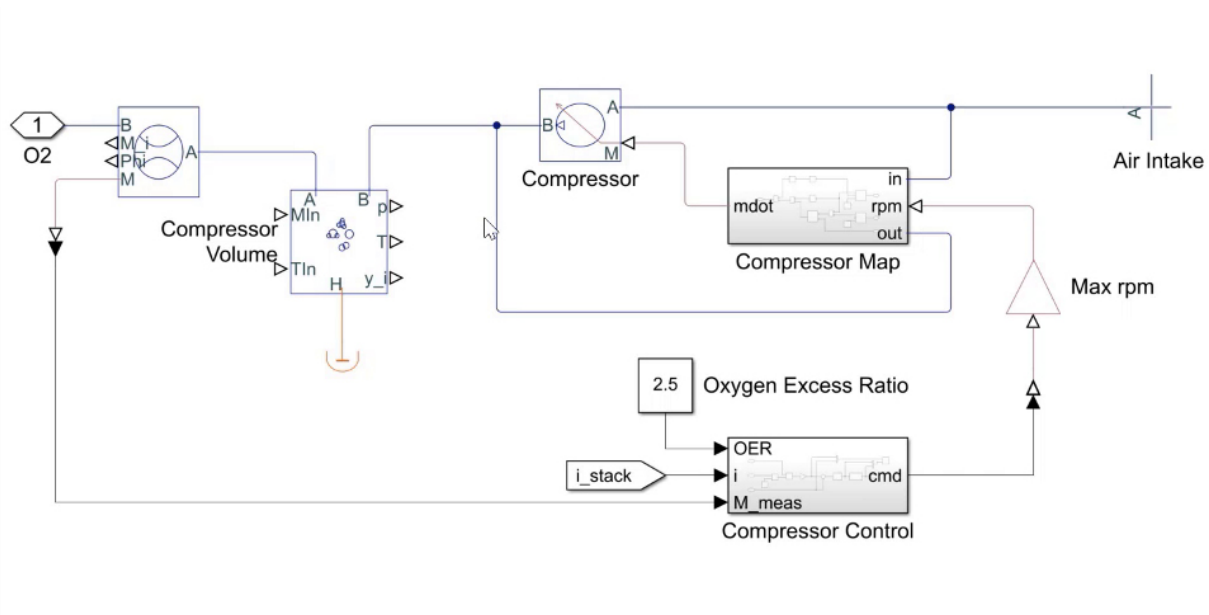


Figura 8. Compresor de entrada de aire con controlador.

El lado del cátodo del sistema de pila de combustible también difiere del lado del ánodo porque absorbe aire a presión ambiente y, por lo tanto, necesita un compresor para que alcance la presión requerida dentro del stack (Figura 8). El compresor tiene su propio controlador, que actúa sobre la corriente demandada por la carga eléctrica (i_{stack}). Los sistemas de recirculación y purga no son necesarios debido a que el aire es un recurso asequible. Por lo tanto, basta con un simple escape.

Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración está conectado al ánodo, el cátodo y la membrana (Figura 9). Se ha optado por la refrigeración líquida debido a su alta eficiencia. Consta de un depósito, una bomba, un intercambiador de calor, un radiador y un controlador de bomba, que funciona a la temperatura de la pila, cuyo valor de referencia es $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

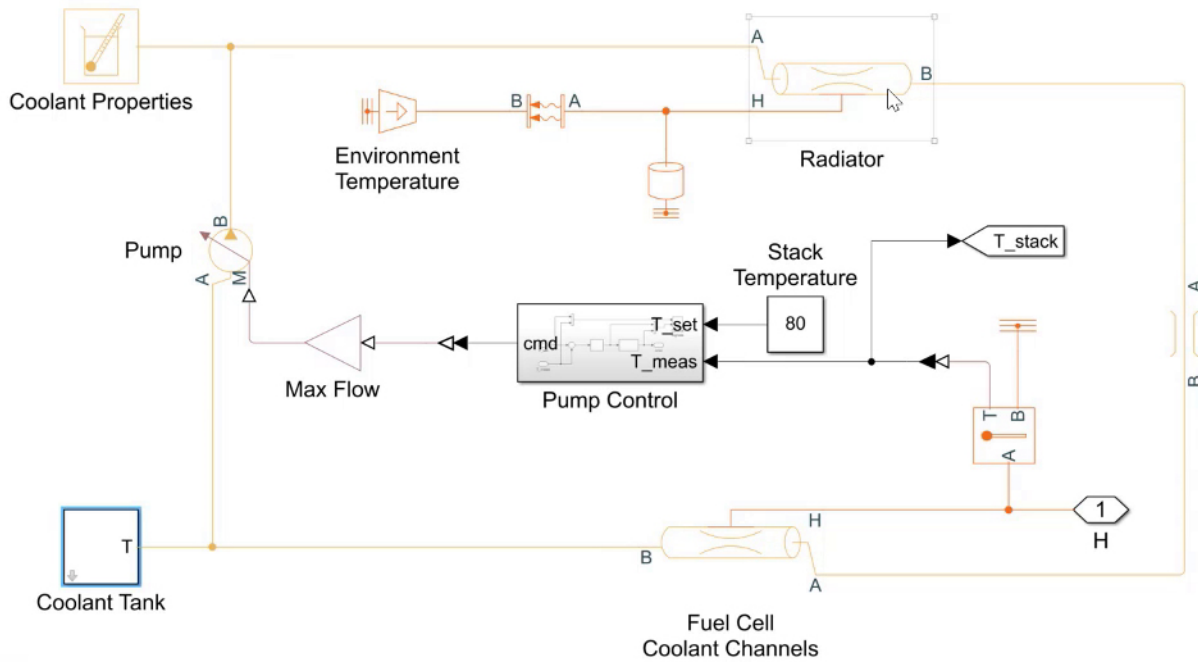


Figura 9. Sistema de refrigeración líquida.

Lenguaje de Simscape: modelado de dominios y componentes personalizados

Puede modelar sus propios componentes y dominios personalizados utilizando el lenguaje de Simscape, basado en MATLAB, que permite crear bloques de Simscape para utilizarlos al igual que otros bloques de librería (Figura 10). Para mayor simplicidad, el ejemplo que se utiliza aquí es el bloque de restricción local del dominio de pila de combustible personalizado.

Example: Local Restriction within Fuel Cell Domain

The diagram shows a block labeled 'Local Restriction (FC)' with three ports: 'AR' (input), 'A', and 'B'. Below the diagram is a screenshot of the component's parameter settings window, which includes a table of parameters and their values.

NAME	VALUE
<input type="checkbox"/> Constant area	
> Minimum restriction area	$\pi \cdot (1e-4 \cdot \text{anode_tube_D})^2 / 4$ m ²
> Maximum restriction area	$\pi \cdot (0.5 \cdot \text{anode_tube_D})^2 / 4$ m ²
> Cross-sectional area at ports A and B	$\pi \cdot \text{anode_tube_D}^2 / 4$ m ²
> Discharge coefficient	0.64
> Laminar flow pressure ratio	0.999

```

component LocalRestriction
% Local Restriction (FC) : 1.5
% This block models the pressure loss due to a flow area r
% as a valve or an orifice in a fuel cell network. There i
% heat exchange with the environment. Choked flow occurs w
% restriction reaches sonic condition. The restriction are
% the physical signal port AR [m^2]. The input is limited
% and maximum restriction area.
%
% Fuel cell species: nitrogen, oxygen, hydrogen, water
% Copyright 2020-2021 The MathWorks, Inc.

inputs
AR = {0.001, 'm^2'}; % AR
end
nodes
A = FuelCell.FuelCell; % A
B = FuelCell.FuelCell; % B
end
parameters
min_area = {1e-10, 'm^2'}; % Minimum restricti
max_area = {0.005, 'm^2'}; % Maximum restricti
area = {0.01, 'm^2'}; % Cross-sectional area at ports
Cd = 0.64; % Discharge coefficient
B_lam = 0.999; % Laminar flow pressure ratio
end
equations
% Pressure at the restricti
p_R == p_in - Dp_in_R;

% Mass balance
mdot_A + mdot_B == 0;
mdot_A_i + mdot_B_i == 0;
    
```

Figura 10. Componente del bloque de restricción local desarrollado con el lenguaje de Simscape.

El código fuente (Figura 10, derecha) comienza con `component` o `domain`, seguido del nombre. Puede contener una descripción del bloque seguida de las entradas que utiliza: AR, nodos (A y B) y parámetros que se pueden configurar utilizando la máscara de parámetros (parte inferior izquierda).

Las ecuaciones constituyen la parte clave de un bloque personalizado. Expresan el comportamiento del componente, como la presión en la entrada de la restricción y el equilibrio másico en este ejemplo. Además, los bloques pueden incluir ecuaciones de equilibrio de energía o de otro tipo.

Si colabora con otros o distribuye sus modelos y librerías, puede guardarlos como archivos binarios para proteger mejor su propiedad intelectual.

Bloques de Simscape: selección de niveles de fidelidad para modelado de sistemas

El modelo que se presenta aquí utiliza un enfoque de principios básicos con dinámica de gases completa. Puede utilizar este nivel de fidelidad para dimensionar los componentes, diseñar y validar los sistemas de control, ajustar los controladores e identificar la concentración de todas las especies de gases en las ramas del sistema.

En algunas aplicaciones, es necesario o suficiente un nivel de fidelidad inferior, ya sea porque cada simulación tarda demasiado tiempo o porque solo se necesita representar un comportamiento aproximado. Para estos casos, Simscape Electrical™ incluye un bloque de pila de combustible simple que refleja el comportamiento de la tensión frente a la corriente (Figura 11, parte inferior izquierda).

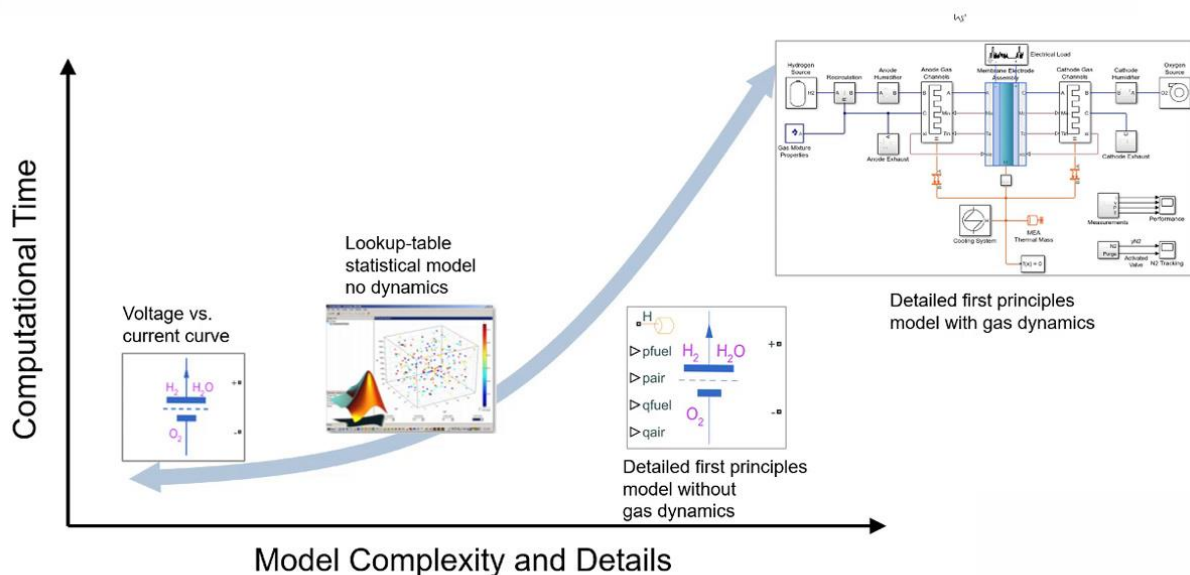


Figura 11. El tiempo computacional aumenta como una función de la complejidad de los modelos.

Simscape Electrical también contiene modelos más detallados basados en principios elementales pero sin dinámica de gases (segunda imagen desde la derecha), así como modelos estadísticos basados en tablas de búsqueda (segunda imagen desde la izquierda) sin dinámica. No obstante, estos modelos estadísticos requieren gran cantidad de mediciones para recopilar los datos necesarios.

En función de la aplicación, estos distintos modelos permiten seleccionar el que mejor se adapte a sus necesidades en términos de nivel de detalle y velocidad de simulación. También puede extraer un modelo basado en tablas de búsqueda a partir del modelo detallado completo y utilizarlo para acelerar las simulaciones en etapas de desarrollo posteriores sin sacrificar la precisión. Puede aumentar la productividad y acortar los plazos

de desarrollo junto con otros métodos de aceleración de la simulación, como la paralelización o el cálculo en la nube.

Conclusión

Simscape ofrece opciones para modelar pilas de combustible con diferentes niveles de fidelidad. Se pueden modelar con precisión componentes individuales tales como la pila, depósitos, válvulas, humidificadores y compresores de diferentes dominios de ingeniería junto con sus respectivos controladores.

Empleando dominios y componentes personalizados, los modelos de Simscape capturan el comportamiento de sistemas de pila de combustible completos, incluidas las características termodinámicas y de difusión detalladas de gases mezclados, así como en el dominio térmico y líquido, para gestionar la temperatura y la humidificación.

Puede utilizar estos modelos de simulación para diseño, ajuste de parámetros de componentes, validación y generación de código de controladores y lógica, estudios de integración, y optimización de parámetros de control y sistemas.

Próximos pasos

[Más información sobre modelos de pilas de combustible](#)

[Webinar: Integración de pilas de combustible para propulsión electrificada](#)