

Inversión de la causalidad computacional en el modelado dinámico. Caso práctico de una planta de generación de hidrógeno solar

Alberto de la Calle^a

^aCIESOL, Centro mixto UAL-PSA CIEMAT, Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, España. alberto.calle@psa.es

Lidia Roca^{a,b}, Javier Bonilla^{a,b}

^bCIEMAT - Plataforma Solar de Almería, Ctra. de Senés s/n 04200 Tabernas, Almería, España.
{lidia.roca,javier.bonilla}@psa.es

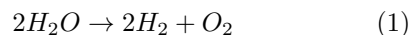
Resumen

La inversión de la causalidad computacional de los modelos es uno de los principales problemas cuando se pretende definir una funcionalidad diferente a un modelo que no ha sido diseñado para tal fin. Una implementación acausal del modelo permite la reutilización del código evitando tener que reescribirlo, ya que los entornos de simulación para este tipo de modelos se encargan de resolver la causalidad computacional. Sin embargo, al resolver el nuevo sistema de ecuaciones se puede dar el caso de que se encuentre que una de las nuevas entradas sea una variable de estado del sistema y el entorno no sea capaz de integrarla. En este artículo se estudia un caso concreto de inversión de la causalidad computacional de un modelo, el de una planta de generación de hidrógeno solar.

Palabras clave: Modelado orientado a objetos, Modelica, causalidad computacional.

1. Introducción

En la búsqueda de fuentes de energías alternativas limpias, las tecnologías relacionadas con hidrógeno han adquirido una buena posición debido a su potencial para reemplazar los combustibles fósiles en numerosas aplicaciones. Este es el motivo por el cual la investigación en nuevos métodos de producción de hidrógeno se han intensificado en los últimos años [10]. Parece razonable que el agua, compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, por su abundancia y asequibilidad sea la materia prima ideal para producir hidrógeno.

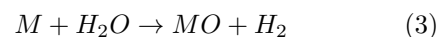
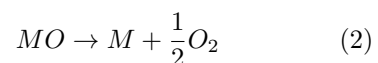


Sin embargo, la ruptura de los enlaces atómicos en la molécula del agua (v. Eq. 1) usando solo calor es un proceso que requiere temperaturas muy altas (cercas a los 2500 K) para lograr un grado significativo de disociación. Además, precisa de una técnica para separar la mezcla resultante dada la

alta afinidad de recombinación y que en casos de altas concentraciones es altamente explosiva [17].

En los últimos años se han desarrollado numerosos procesos termoquímicos para la generación de hidrógeno que usan la energía solar concentrada como fuente de energía primaria. El *solar reforming*, el *solar cracking* y la gasificación solar usan combustibles fósiles como reactivos [17]. Los ciclos termoquímicos de ruptura del agua son una de las técnicas más prometedoras para lograr la disociación evitando los problemas de la separación y las altas temperaturas. Este tipo de sistemas reduce los requisitos de temperatura permitiendo ser alcanzables con sistemas de energía solar concentrada. Además, al ser sistemas cíclicos, la generación de hidrógeno y oxígeno se produce en pasos diferentes, evitando complejos mecanismos para la separación de los productos. Numerosos estudios se han publicado acerca del catalizador usado, de la configuración multi-paso y del diseño del reactor [17, 16, 4, 5].

Los sistemas redox de dos pasos son uno de los ciclos termoquímicos de ruptura del agua más eficientes [17]. La idea es sencilla, un óxido metálico que es reducido, i.e. pierde una molécula de oxígeno de la capa superficial, tiene una gran afinidad para absorber oxígeno del agua. Los sistemas redox de dos pasos se aprovechan de esta capacidad. En el primer paso, el óxido metálico, MO , mediante el uso de calor es reducido, M , liberando el oxígeno (v. Eq. 2). En el segundo paso, ya con la presencia de agua, se produce la disociación. El óxido reducido atrapa del el oxígeno perdido en la anterior etapa y libera el hidrógeno (v. Eq. 3).



El proyecto Hydrosol ha desarrollado y demostrado la producción continua de hidrógeno a partir del agua con energía solar basándose en estas ideas [13]. El objetivo del proyecto Hydrosol II fue desa-

rollar un estudio de viabilidad para una planta de producción a gran escala. Como resultado de este estudio se construyó en el CIEMAT-Plataforma Solar de Almería una planta piloto [14]. El proyecto Hydrosol 3D estudió la viabilidad de una planta a escala comercial. Este trabajo se centra en este último proyecto.

Roeb et al. [13] desarrollaron un modelo del primer reactor a escala de laboratorio que se construyó en el marco del proyecto Hydrosol. Este modelo permitía la predicción dinámica del comportamiento térmico usando un método de cálculo de volúmenes finitos radiales para los balances de masa y energía. Fue validado con datos experimentales usando un horno solar para concentrar la irradiancia solar¹.

Un nuevo modelo de un sistema de producción de hidrógeno fue presentado por Säck et al. [15]. Este modelo fue desarrollado modularmente en tres bloques: una herramienta de simulación de la distribución de potencia, un modelo térmico y un modelo para la producción de hidrógeno. Los tres se conectan a un software de control que maneja las comunicaciones entre ellos, las entradas y las salidas del sistema, usando una interfaz en LabVIEW. La herramienta de simulación de la distribución de potencia es un código modular de trazado de rayos desarrollado en lenguaje C y lenguaje ensamblador embebido en una interfaz LabVIEW. Dicho software simula la distribución de potencia mediante el cálculo del número de rayos que alcanza la apertura del reactor por unidad de área. Para ello, usa medidas de la deflectometría de algunos heliostatos representativos. La deflectometría evalúa la curvatura local de los espejos mediante el estudio de las deformaciones en patrones de líneas reflejadas en la superficie de los heliostatos [2]. Los modelos de temperatura y producción de hidrógeno están programados en módulos de simulación de LabVIEW. El modelo de producción de hidrógeno usa un *Shrinking Core Model* que ha sido ajustado con datos empíricos obtenidos por Neises et al. [8].

Con el objetivo de crear una herramienta de simulación para desarrollar nuevas estrategias automáticas de operación de una planta de generación de hidrógeno solar del tipo Hydrosol II, de la Calle et al. [3] desarrollaron e implementaron un nuevo modelo dinámico que cumplía con unos requisitos mínimos de velocidad de ejecución y precisión. Este fue construido aplicando una metodología de modelado orientado a objetos, que permite un planteamiento modular y jerárquico del mis-

¹El horno solar tiene una distribución menos uniforme en el absorbedor que los sistemas de receptor central, como el usado en la planta piloto.

mo. Se diseñaron distintos niveles de abstracción, pudiendo desligarse en dos submodelos diferentes el comportamiento del campo de heliostatos y de la planta de procesamiento. Los modelos se implementaron en el lenguaje de modelado Modelica, un lenguaje de tipo declarativo que permitió un planteamiento acausal de los mismos. Este modelo fue calibrado y validado con datos experimentales mostrando una buena concordancia entre simulación y experimento.

El modelo desarrollado por de la Calle et al. [3] ha supuesto un importante avance para el manejo de la planta. La estrategia de operación del campo de heliostatos hasta entonces era manual, basada en la experiencia del operador. Aunque esta estrategia es suficiente para operar en condiciones nominales, automatizarla de modo que se determine qué heliostato debe estar enfocado en el receptor para alcanzar la temperatura deseada permite un mejor tratamiento de las perturbaciones, e.g. irradiancia solar variable, y una reducción de los tiempos de transición entre ciclos, mejorando la producción continua de hidrógeno. Dos estructuras de control han sido probadas en la planta [11, 12]. En la primera, la estructura de control regula la temperatura media de un reactor de la planta. El modelo del campo de heliostatos se usa para crear un vector de las potencias ordenadas de menor a mayor, donde un PI adaptativo por tabla (*gain scheduling*) escoge el número necesario de heliostatos enfocados. El control se probó primero en el modelo de la planta de generación y posteriormente en la planta experimental obteniéndose buenos resultados. En el segundo trabajo, la estructura de control regula la potencia solar concentrada en el reactor. Para ello, es necesario un modelo de la planta que pueda calcular la potencia concentrada necesaria para seguir una cierta temperatura. Esta potencia será la referencia y el campo de heliostatos es regulado con un control *feedforward* que usa el modelo del campo. Esta estructura de control también fue probada primero en el modelo de la planta y posteriormente en la planta experimental.

Este artículo muestra en detalle como se invirtió la causalidad del modelo de la planta de procesamiento para que este pudiera ser usado en la estructura de control propuesta en [12].

2. Descripción de la planta

La planta piloto para la producción de hidrógeno solar del proyecto Hydrosol II fue instalada en el CIEMAT-Plataforma Solar de Almería [14]. Con una potencia máxima de 100 kW_{th} es capaz de producir hidrógeno de forma cuasi-continua. Para ello, dos reactores iguales dispuestos en para-



Figura 1: Vista general de la planta piloto HydroSol II

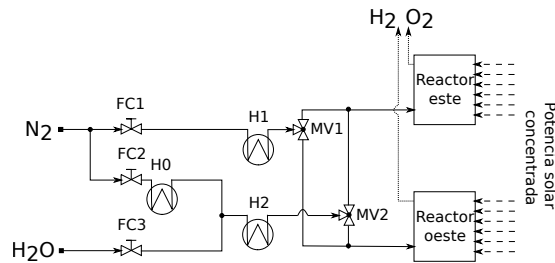


Figura 2: Diagrama de flujos de la planta piloto HydroSol II

lelo alternan ciclos de producción de hidrógeno-oxígeno. El absorbedor del reactor está compuesto por 9 monolitos aplanados cada uno con unas dimensiones de 0.146 m x 0.146 m x 0.06 m, que están ensamblados formando un único módulo de geometría cuadrada. Los monolitos están compuestos por carburo de silicio (SiC), un material que soporta las temperaturas que se alcanzan en el reactor. Sobre ellos está impresa una lámina del óxido metálico que actúa como catalizador de la reacción.

Los reactores están instalados a media altura en la torre solar SSPS-CRS (v. Fig. 1). El campo solar está formado por 93 heliostatos Martin Marietta. Cada heliostato posee 12 facetas de 3.3 m², formando una superficie de aproximadamente 40 m². Cinco distancias focales son suficientes para cubrir todo el campo: 67 m, 97 m, 115 m, 136 m y 162 m [15]. Con una irradiancia solar directa típica de 950 W/m², el campo solar proporciona una potencia 2.7 MW_{th} y una densidad de potencia pico de 2.5 MW/m². Aproximadamente, el 99% de la potencia es acumulada en una circunferencia de 2.5 m de diámetro, y el 90% en una de 1.8 m. La apertura de cada reactor es de 0.5 m x 0.5 m, por tanto, gran parte de la potencia concentrada no alcanza el absorbedor. La que incide sobre la apertura, tiene una distribución de potencia casi uniforme ya que es la parte más cercana al pico de potencia.

El objetivo principal del proyecto es lograr una producción constante de hidrógeno. Para ello, se dispone de un sistema redox de dos pasos. La reacción de reducción (v. Eq. 2) es endotérmica y se produce a una temperatura de operación $T_{red} = 1200$ °C. La reacción de disociación del agua (v. Eq. 3) es exotérmica y su temperatura de operación es de $T_{dis} = 800$ °C. Por tanto, se requieren dos valores de potencia diferentes, uno para cada ciclo.

Aunque el ciclo alcanzaría mayor eficiencia teniendo unas temperaturas de operación mayores, la degradación de la lámina de óxido lo impide. Un problema aún no resuelto con este tipo de ciclos es que el estrés térmico al que está sometido el material lo desgasta limitando la producción a un número de ciclos determinado. A temperaturas superiores a 1200 °C se ha observado que el SiC reacciona con el óxido [8].

Para que las reacciones tengan lugar, se precisa de una atmósfera gaseosa, ya que éstas se producen en la interfase sólido-gas. El gas fluye dentro de los reactores a través de los canales de los monolitos. Para el ciclo de reducción, se emplea nitrógeno; para la disociación, se emplea una mezcla de vapor de agua y nitrógeno. El nitrógeno es inerte a las reacciones, y se utiliza para expulsar los gases de reacción.

El esquema de la planta se muestra en el diagrama de la Fig. 2. Los dos reactores de la planta trabajan en paralelo. Las reacciones se alternan de un reactor a otro, mientras uno está en el ciclo de reducción el otro está en el de disociación. Cuando las reacciones se agotan, los ciclos se conmutan. Un sistema de válvulas (MV1 y MV2) permite que cada reactor reciba un flujo de nitrógeno o de mezcla de agua y nitrógeno, según corresponda con el ciclo. El nitrógeno es precalentado con los calentadores H0 y H1, dependiendo de la línea seguida. La mezcla de agua y nitrógeno también es precalentada por el calentador H2. Las válvulas FC1, FC2 y FC3 permiten controlar el caudal y la concentración de los flujos de gas de entrada a los reactores. Para mantener los reactores a su temperatura de operación, y por tanto que las reacciones puedan producirse, es necesaria una cantidad precisa de potencia térmica. Esta proviene del campo de heliostatos que concentra la irradiancia solar en la apertura de los reactores.

3. Modelado orientado a objetos

Los modelos descritos en esta sección siguen una metodología de modelado orientado a objetos, modular y jerárquica. Para que esto sea posible, los modelos han de ser implementados un lenguaje

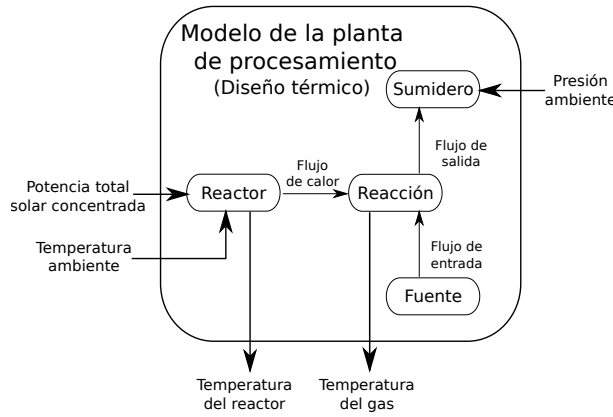


Figura 3: Esquema del modelo de la planta de procesamiento (diseño térmico)

de modelado acausal, que en este caso es Modelica 2.2.1 [7]. Este tipo de lenguajes son lenguajes declarativos, donde las relaciones matemáticas que contienen los modelos no especifican exactamente cómo encontrar la solución, en contraposición con los lenguajes imperativos donde relaciones matemáticas son asignaciones. Los entornos de simulación que manejan estos lenguajes además de tener algoritmos para asignar la causalidad computacional disponen de algoritmos para que el cálculo de la variable asignada sea posible.

El modelo de la planta fue diseñado según se describe en [3]. La estructura jerárquica dividía el modelo completo en dos: el del campo de heliostatos y el de la planta de procesamiento. Este último a su vez, estaba dividido en cuatro submodelos interconectados: reactor, reacción, fuente y sumidero. El submodelo de la reacción incluía el comportamiento químico, el cual no pudo ser validado con datos experimentales.

Para este trabajo se ha extraído el modelo de la planta de procesamiento de dicho artículo. Este ha sido simplificado desligando el comportamiento puramente térmico del químico, que ha sido despreciado. A continuación, se describen los principales detalles de este modelo.

3.1. Diseño térmico

El diseño térmico del modelo se muestra en la Fig. 3. El objetivo del modelo es reproducir únicamente su comportamiento térmico (temperatura del reactor y temperatura del gas). Como entradas al modelo se tiene la potencia solar concentrada por el campo de heliostatos, la temperatura y presión ambiente. Los siguientes submodelos componen el modelo final.

Fuente. El sistema de canalización, mezcla y precalentamiento del gas (N_2 - H_2O) proporciona a

los reactores un caudal constante a una temperatura fija de 200 °C. La composición del mismo también es fija dependiendo del ciclo químico de los reactores. Una señal de conmutación permite intercambiar esta composición. Para el modelo térmico, se obvia este mecanismo de conmutación. No se especifica el tipo de gas que entra y sale del reactor. Un conector propio permite la comunicación con el modelo de la reacción. La información que se transmite es el flujo másico y la temperatura del gas, que son asignados como parámetros del modelo.

Reactor. El reactor ha sido modelado como una masa de metal que recibe toda la potencia concentrada por el campo de heliostatos. Este a su vez, intercambia energía con el ambiente mediante procesos radiativos y convectivos. También intercambia energía con el gas que circula dentro del reactor mediante procesos convectivos. La conducción en el reactor es despreciada debido a su escasa contribución. La masa y el calor específico de este bloque, m_{reac} y $c_{p,reac}$, son asumidos como parámetros constantes que deben ser calibrados. Los balances de energía son los siguientes:

$$\begin{aligned} U_{reac} &= m_{reac}c_{p,reac}T_{reac}, \\ \dot{U}_{reac} &= P - \dot{Q}_{conv,gas} - \dot{Q}_{rad,env} - \dot{Q}_{conv,env}, \end{aligned} \quad (4)$$

donde U_{reac} es la energía interna del reactor, y T_{reac} la temperatura del reactor. P es la potencia solar total concentrada proveniente del campo de heliostatos, $\dot{Q}_{conv,gas}$ el flujo de calor transferido con el gas y $\dot{Q}_{conv,env}$ y $\dot{Q}_{rad,env}$ son las pérdidas de calor entre el reactor y el ambiente, expresados como:

$$\dot{Q}_{conv,gas} = \alpha_{conv,gas}^A (T_{reac} - T_{gas}), \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{conv,env} = \alpha_{conv,env}^A (T_{reac} - T_{env}), \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{rad,env} = \alpha_{rad,env}^A (T_{reac}^4 - T_{gas}^4). \quad (7)$$

El coeficiente de transferencia de calor por el área de contacto de cada una de las transferencias, α^A , es considerado constante y es un parámetro a calibrar.

La comunicación con el modelo del campo de heliostatos y de la reacción se realiza mediante el conector *HeatPort* de la Modelica Standard Library que transmite flujo de calor y temperatura. La temperatura ambiente también se recibe por un conector de este tipo.

Reacción. El balance de energía dentro del reactor es modelado por la mezcla de gases. Si se desprecia la energía consumida por la reacción, la ecuación es un balance entre el flujo de calor convectivo recibido, el trabajo realizado por el gas y

el balance negativo dado por la entrada fría y la salida caliente del gas, que puede expresarse como:

$$\begin{aligned} U_{gas} &= m_{gas}c_{p,gas}T_{gas} - p_{gas}V, \\ \dot{U}_{gas} &= \dot{Q}_{conv,gas} + \dot{m}_{gas,in}c_{p,gas}T_{gas,in} \\ &\quad - \dot{m}_{gas,out}c_{p,gas}T_{gas}. \end{aligned} \quad (8)$$

La masa de gas, m_{gas} , se calcula con un sencillo balance másico:

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{gas,in} - \dot{m}_{gas,out}, \quad (9)$$

donde $\dot{m}_{gas,in}$ y $\dot{m}_{gas,out}$ son los flujos másicos de entrada-salida. La Eq. 8 permite calcular la temperatura del gas, T_{gas} . El volumen, V , y el calor específico del gas, $c_{p,gas}$ son parámetros del sistema. Este calor específico fue calculado considerando el coeficiente de dilatación adiabática $\gamma=1.4$. El peso molecular del nitrógeno fue el utilizado en los cálculos molares, por ser el gas más abundante en el reactor.

La presión del reactor, p_{gas} , es calculada con la ecuación de estado de los gases ideales.

$$p_{gas}V = m_{gas}KT_{gas}, \quad (10)$$

donde K es la constante másica de los gases ideales para el nitrógeno.

Los flujos másicos de entrada y salida así como sus temperaturas son transmitidos a la fuente y al sumidero por un conector diseñado para tal fin, que además también transmite la presión del gas. La comunicación con el modelo del reactor se hace a través de un conector *HeatPort*.

Sumidero. El gas abandona los reactores a través de un orificio que tras su paso por una tubería es liberado a la atmósfera. Para modelar el flujo de salida, se asume el principio de Bernoulli ya que es válido para fluidos compresibles que se mueven a bajas velocidades. Si se consideran dos puntos de una misma línea de corriente que se encuentran en la misma altura y uno está dentro del reactor entonces la velocidad de salida del fluido se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$v_{gas,out} = [2(p_{gas} - p_{env})\rho^{-1}]^{1/2}, \quad (11)$$

donde p_{env} es la presión ambiente. El flujo másico de salida será entonces:

$$\dot{m}_{gas,out} = C_d A_s \rho v_{gas,out}, \quad (12)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga (que refleja la relación entre flujos reales y teóricos) y A_s el área del orificio de salida. Como el coeficiente de descarga y el área del orificio solo aparecen en una única ecuación, fueron calibrados como un único parámetro.

4. Inversión de causalidad

Una de las mayores ventajas de trabajar con una metodología de modelado orientado a objetos es la implementación acausal de los modelos. En numerosas ocasiones, se encuentran diferentes aplicaciones a los modelos que para los que fueron diseñados, y uno de los mayores escollos que suele surgir es el problema de la causalidad computacional de los mismos, porque lo que antes eran entradas ahora son salidas. Una implementación acausal evita reescribir todo el código, y que sea el entorno de simulación el que se encargue de resolver el nuevo modelo. Pero no siempre este es capaz de resolverlo. Uno de los motivos es que el nuevo diseño del modelo exija un cambio de las variables de estado, y este, no sea posible. Cuando la nueva entrada es una de las variables de estado del sistema antiguo salta un mensaje de error, ya que los entornos de simulación a menudo no están preparados para integrar una entrada. Este problema no es exclusivo de la inversión de modelos.

En el trabajo de Looye et al. se analiza el problema de la inversión de modelado para sistemas no lineales enfatizando su utilidad para el diseño de estructuras de control [6]. La solución propuesta está basada en el algoritmo de Pantelides de reducción de índice [9]. El principal problema para su aplicabilidad en este caso es que implica una reformulación del problema, para modelos sencillos es de fácil aplicación pero para modelos con un alto orden de jerarquización supone una tarea tediosa.

Las soluciones que aquí se proponen resuelven el problema de inversión para el modelo presentado sin modificar ninguna línea de código del mismo. Dos soluciones diferentes fueron estudiadas. La primera fue calcular la derivada de la entrada fuera de línea (*offline*). Un método de derivación por diferencias finitas permite calcular esta derivada para todos los puntos de los que se han tomado datos menos para el primero, al cual se le asigna un valor de 0. Este procedimiento tiene la ventaja de ser muy rápido, ya que consiste en una simple resta. Sin embargo, tiene la desventaja de que es un preprocesamiento de los datos y por tanto requiere de un código externo que haga esta operación en línea si se quiere utilizar en una aplicación en tiempo real.² Otra desventaja es que si el paso de integración no coincide con la constante de tiempo de la derivada, el error producido puede llegar a ser relevante. Dymola usa un método de interpolación lineal para calcular el

²Una vez realizado el experimento, el preprocesamiento de los datos se realizó en Matlab. Las simulaciones se hicieron con Dymola y con un archivo de trayectorias, nunca en tiempo real sobre la planta.

valor de la entrada a partir de los datos proporcionados. DASSL, que es el integrador numérico que usa Dymola por defecto, es un integrador de paso variable y aunque puede llegar a ser muy preciso para los transitorios, cuando el sistema está en un estado estacionario el paso de integración es grande.

La otra opción estudiada fue la de la derivación en línea (*online*). DASSL complica la aplicación de un método de diferencias finitas para calcular la derivada de la entrada. Dymola no ofrece información en línea del paso de integración, además, saber el valor previo de las variables de estado cuando el integrador se ve obligado a reducir el tamaño del paso, resulta complicado. La siguiente aproximación matemática permite aplicar el método de las diferencias finitas a la entrada del sistema, u , y calcular su derivada, du , con el siguiente código:

```
du=(1/T)*(u-x);
der(x)=(1/T)*(u-x);
```

Listing 1: Derivación en línea

donde T es el parámetro de tiempo y x una variable auxiliar. Cuanto menor sea T , mayor precisión y mayor esfuerzo computacional. Este método puede usarse para aplicaciones en tiempo real, pero ralentiza las simulaciones ya que añade una variable de estado adicional al modelo.

Un buena idea cuando se calcula una derivada de forma numérica es ponerle un valor límite de saturación. Si hay un cambio abrupto en la variable, la derivada tenderá a infinito y puede que incurra en problemas numéricos. Un valor alto de este límite no afectará en exceso la dinámica del sistema y le añadirá robustez. La derivación en línea de la forma en la que se ha planteado tiende a introducir una oscilación parásita de alta frecuencia en el resultado. Cuanto menor es el parámetro de tiempo, mayor es la oscilación en amplitud y frecuencia llegando a apantallar el cálculo. Un filtro paso bajo resuelve este problema permitiendo usar menores valores del parámetro de tiempo ganando en precisión.

El diseño inverso del modelo de la planta de procesamiento es el mostrado en la Fig. 4. En él, el objetivo es calcular la potencia necesaria por el reactor para que siga un determinado perfil de temperatura. Los componentes son los mismos que los descritos en la sección anterior. Como la temperatura es una variable de estado, y ahora, también una entrada; se requiere alguno de los dos métodos explicados previamente para calcularla. La solución escogida fue la de la derivación en línea ya que resultaba más sencillo a la hora de la implementación de la estrategia de control.

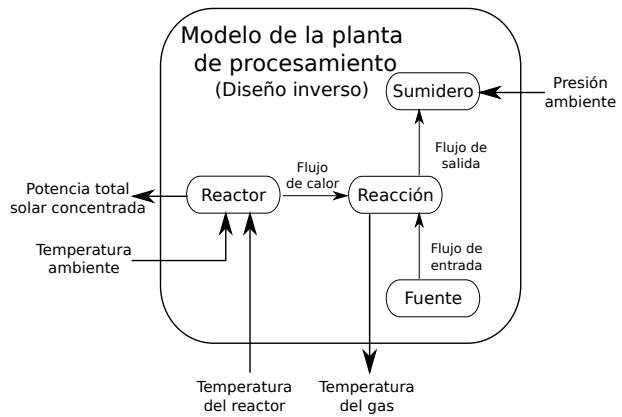


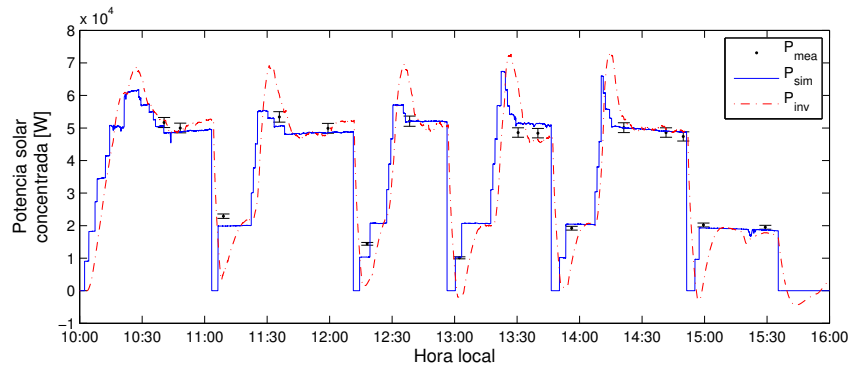
Figura 4: Esquema del modelo de la planta de procesamiento (diseño inverso)

5. Simulación dinámica

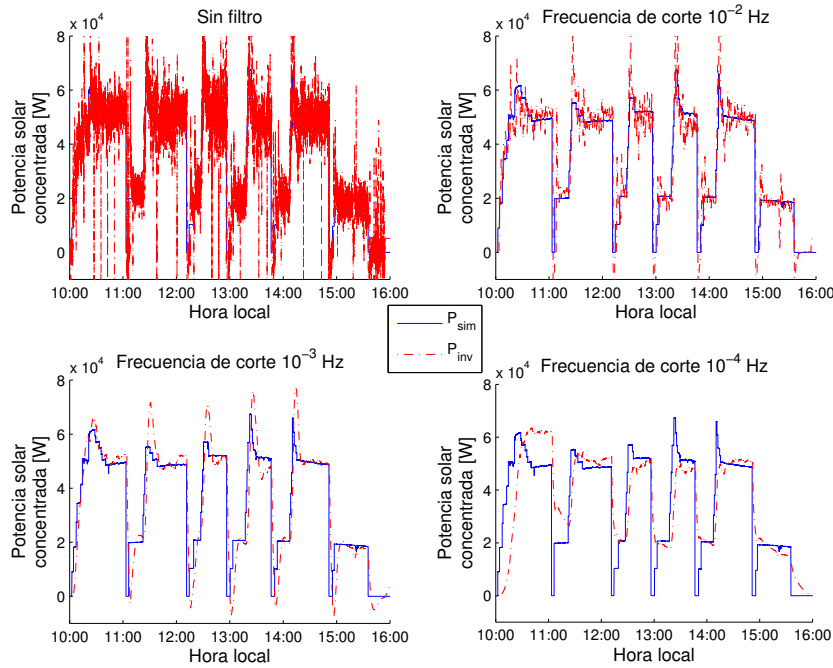
Los trabajos de simulación de los modelos expuestos fueron realizados con Dymola 6.0b. El algoritmo de integración numérica fue DASSL y la tolerancia relativa y absoluta usada fue 10^{-4} . La serie de experimentos para la calibración y la validación fue tomada de la campaña experimental del proyecto Hydrosol 3D. La calibración obtenida por de la Calle et al. [3] fue la empleada en este trabajo.

El modelo inverso se validó con la simulación de la potencia solar concentrada del reactor este del experimento del día 18 de febrero de 2011. Como entrada al modelo se empleó la temperatura medida en el reactor mostrada en [3]. El resultado de la simulación puede verse en la Fig. 5(a). Las medidas de la potencia solar concentrada, P_{mea} , fueron obtenidas usando un sistema compuesto por una barra rotatoria con un blanco lambertiano y una cámara CCD que ha permitido la captura puntual de la distribución de potencia en los focos [1]. El error en la medida usando este sistema es de al menos un 3%. Como dichas medidas son insuficientes para validar el comportamiento de la planta, se usa la potencia solar concentrada calculada por el modelo del campo de heliostatos de [3], P_{sim} . Como puede observarse, la salida del modelo inverso, P_{inv} , sigue el comportamiento de la curva de la potencia simulada. El comportamiento mostrado por el modelo inverso es más suave que el esperado debido a que no refleja la discretización de la potencia impuesta por el número de heliostatos enfocados. El error relativo medio entre las dos simulaciones es del 16%. Es importante resaltar, que aunque el modelo en algunos puntos muestra potencias negativas estas no son posibles en la realidad.

Como se comentó en la sección anterior, la derivación en línea provoca una oscilación parásita de



(a) Validación del comportamiento inverso



(b) Comparación de las frecuencias de corte del filtro

Figura 5: Simulación dinámica

alta frecuencia que puede mitigarse con un filtro pasa bajo. Para la simulación de la Fig. 5(a) se seleccionó una frecuencia de corte de $8 \cdot 10^{-4}$ Hz. La elección de esta frecuencia de corte es clave, ya que una mala elección provoca resultados no deseados. La Fig. 5(b) muestra el efecto del filtro en el modelo. Arriba a la izquierda se ve el resultado sin filtrar. Arriba a la derecha, se observa la respuesta aplicando una frecuencia de corte de 10^{-2} Hz. Dicha frecuencia es insuficiente para eliminar la oscilación. Abajo a la izquierda se ve el resultado con el filtro de 10^{-3} Hz, un resultado muy similar al mostrado en la Fig. 5(a). Finalmente, abajo a la derecha se puede observar el efecto de una frecuencia de corte de 10^{-4} Hz. Esta última frecuencia de corte es excesiva, ya que apantalla la dinámica del modelo.

6. Conclusiones

En este artículo se estudia la inversión de la causalidad computacional de un modelo de una planta de generación de hidrógeno solar. Este modelo fue construido con una metodología de modelado orientado a objetos, modular y jerárquica. Al ser implementada en un lenguaje de modelado declarativo como Modelica, el trabajo de la inversión recayó en la herramienta de simulación, que en este caso fue Dymola 6.0b. Sin embargo, al hacer la inversión una de las variables de estado del sistema también era una entrada con lo que fue necesaria una derivación explícita de la misma ya que la herramienta no está preparada para ello. Se proponen dos soluciones, de las cuales, una es implementada y probada. Las simulaciones muestran

una buena concordancia con los datos experimentales. También se estudia el efecto de la frecuencia de corte de un filtro pasa bajo necesario para eliminar el ruido que se introduce con la derivación.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado con el apoyo del Proyecto Coordinado del Plan Nacional DPI2014-56364-C2-2-R (ENERPRO).

Referencias

- [1] J. Ballestrín and R. Monterreal. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation. *Energy*, 29(5-6):915–924, 2004.
- [2] B. Belhomme, R. Pitz-Paal, P. Schwarzbözl, and S. Ulmer. A new fast ray tracing tool for high-precision simulation of heliostat fields. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131(3):031002–031010, 2009.
- [3] A. de la Calle, L. Roca, L. J. Yebra, and S. Dormido. Modeling of a two-step solar hydrogen production plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(14):10549 – 10556, May 2012.
- [4] J. E. Funk. Thermochemical hydrogen production: past and present. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(3):185–190, Mar. 2001.
- [5] T. Kodama and N. Gokon. Thermochemical cycles for high-temperature solar hydrogen production. *Chemical reviews*, 107(10):4048–77, Oct. 2007.
- [6] G. Looye, M. Thümmel, M. Kurze, M. Otter, and J. Bals. Nonlinear Inverse Models for Control. *Proc. 3rd International Modelica Conference*, 2005.
- [7] Modelica Association. Modelica Specification 2.2.1, 2007.
- [8] M. Neises, M. Roeb, M. Schmu, C. Sattler, and R. Pitz-paal. Kinetic investigations of the hydrogen production step of a thermochemical cycle using mixed iron oxides coated on ceramic substrates. *International Journal of Energy Research*, 34:651–661, 2010.
- [9] C. Pantelides. The consistent initialization of differential-algebraic systems. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computation*, 9(2):213–231, 1988.
- [10] T. Pregger, D. Graf, W. Krewitt, C. Sattler, M. Roeb, and S. Möller. Prospects of solar thermal hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:4256–4267, 2009.
- [11] L. Roca, A. de la Calle, and L. J. Yebra. Heliostat-field gain-scheduling control applied to a two-step solar hydrogen production plant. *Applied Energy*, 103:298–305, Mar. 2013.
- [12] L. Roca, R. Diaz-Franco, A. de la Calle, J. Bonilla, and A. Vidal. A control based on a knapsack problem for solar hydrogen production. *Optimal Control Applications and Methods*, 2014.
- [13] M. Roeb, M. Neises, J. P. Säck, P. Rietbrock, N. Monnerie, J. Dersch, M. Schmitz, and C. Sattler. Operational strategy of a two-step thermochemical process for solar hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10):4537–4545, 2009.
- [14] M. Roeb, J.-P. Säck, P. Rietbrock, C. Prah, H. Schreiber, M. Neises, L. de Oliveira, D. Graf, M. Ebert, W. Reinalter, M. Meyer-Grünefeldt, C. Sattler, A. Lopez, A. Vidal, A. Elsberg, P. Stobbe, D. Jones, A. Steele, S. Lorentzou, C. Pagkoura, A. Zygogianni, C. Agrafiotis, and A. G. Konstandopoulos. Test operation of a 100 kW pilot plant for solar hydrogen production from water on a solar tower. *Solar Energy*, 85:634–644, 2011.
- [15] J.-P. Säck, M. Roeb, C. Sattler, R. Pitz-Paal, and A. Heinzl. Development of a system model for a hydrogen production process on a solar tower. *Solar Energy*, 86(1):99–111, Oct. 2012.
- [16] N. Serpone, D. Lawless, and R. Terzian. Solar fuels: Status and perspectives. *Solar Energy*, 49(4):221–234, Oct. 1992.
- [17] A. Steinfeld. Solar thermochemical production of hydrogen—a review. *Solar Energy*, 78:603–615, 2005.