

Control predictivo híbrido de una planta de generación de energía integrando paneles fotovoltaicos y pila de combustible

Alejandro J. del Real
ETSI de Sevilla, adelreal@cartuja.us.es
Alicia Arce
ETSI de Sevilla, aarce@cartuja.us.es
Carlos Bordons
ETSI de Sevilla, bordons@esi.us.es

Resumen

Se aplican aquí técnicas de control híbrido a una planta de energía conectada a red y que integra paneles solares fotovoltaicos con un sistema secundario de energía formado por electrolizador, tanques de almacenamiento de hidrógeno y pila de combustible. Este sistema, que combina estados tanto continuos como discretos, dado que puede operar en cuatro modos de funcionamiento distintos, es inherentemente híbrido. Así, se obtuvo una descripción MLD Mixed-Logical-Dynamical de la planta, para después diseñar un controlador óptimo basado en técnicas de programación multiparamétricas, adjuntándose también los resultados simulados del comportamiento del controlador.

Palabras clave: Sistemas híbridos; hidrógeno solar; control MPC híbrido

las referencias marcadas por el nivel inmediatamente superior.

La presencia de transiciones entre estados y restricciones hacen híbrido el problema, siendo las principales contribuciones de este trabajo la demostración de la aplicabilidad de estas nuevas técnicas al modelado de sistemas híbridos [1] y al diseño de controladores óptimos [2, 3] para una planta de energía. También es interesante la utilización de la herramienta HYSDEL [4] (Hybrid Systems Description Language) para el diseño de controladores a partir de modelos lineales de la planta. En primer lugar, se describe el sistema con una descripción MLD (Mixed-Logical-Dynamical). Después, se diseña y sintoniza un controlador predictivo híbrido utilizando técnicas de programación multiparamétricas. Finalmente, se muestra la eficiencia del controlador mediante resultados en simulación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo, se describe la aplicación de las técnicas de control y modelado de sistemas híbridos a una planta generadora de energía conectada a la red eléctrica. La planta está compuesta por un campo fotovoltaico y una fuente secundaria de energía, que consta de electrolizador, tanques de hidrógeno y una pila de combustible tipo PEM. El sistema es inherentemente híbrido al combinar dinámicas continuas y discretas. En efecto, puede operar en cuatro modos de funcionamiento distintos, dependiendo de la configuración del circuito de potencia y del estado de la pila de combustible. Las dimensiones de los dispositivos se han escogido para hacer posible la implementación real del sistema como pequeño banco de ensayos en un laboratorio. El escenario global de control se compone de tres partes: un generador de referencia que estima la mejor planificación de producción energética basada en medidas y consideraciones económicas; un segundo nivel inferior, en el cual este trabajo se centra, que estima la mejor manera de seguir la referencia creada por el nivel superior, calculando asimismo las referencias que cada dispositivo de la planta debe seguir; y por último el nivel inferior, que corresponde al controlador específico de cada dispositivo, y que seguirán

En la Fig. 1 se muestra un diagrama de bloques del sistema. La fuente primaria de energía es un campo fotovoltaico (SP) conectado a la red eléctrica por el interruptor (s), el cual abre y cierra el circuito. La electricidad generada por los paneles solares (P_{av}) al incidir sobre ellos radiación solar (rad) puede ser vertida a red o bien, total o parcialmente derivada al electrolizador (E). La energía consumida por el electrolizador (P_e) es utilizada para la producción de hidrógeno (h), que es almacenado en los depósitos situados en la línea del hidrógeno. La pila de combustible (FC), cuando es necesario, puede ser arrancada, siendo entonces alimentada desde los depósitos de hidrógeno, para de esta manera producir energía (P_{fc}). La potencia total vertida a red (P_g) sería entonces la suma de la potencia generada por la pila de combustible y la aportada por el campo fotovoltaico, restándose a esta última la consumida por el electrolizador. Destacar que todas las dinámicas de los dispositivos de acondicionamiento de potencia necesarios, tales como convertidores DC/AC, se han obviado. Esta simplificación no afecta a la solución del problema, puesto que las dinámicas de dichos dispositivos son mucho más rápidas que las otras dinámicas del sistema, como son la pila de combustible y la tasa de producción y consumo de hidrógeno.

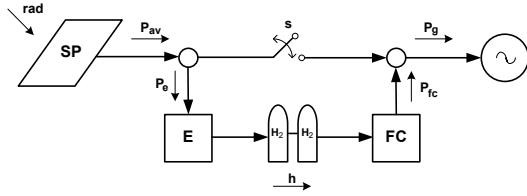


Figura 1: Diagrama del sistema

3. EL PROBLEMA DE CONTROL

El escenario global de control está dividido en tres partes (ver Fig. 2). El nivel superior de la estrategia de control corresponde a la generación de la referencia de la potencia vertida a red ($P_{g,ref}$). Su cálculo se basa en varias variables: las medidas del estado del sistema (como la cantidad de hidrógeno almacenado), el precio de venta de la electricidad, el pronóstico de radiación solar, etc. A partir de todos estos datos, se puede hacer una optimización off-line para maximizar el beneficio, en base a un criterio económico, para obtener la P_g más óptima. El presente trabajo se centra en el siguiente nivel de control. En dicho nivel, se reciben como entradas la referencia $P_{g,ref}$ calculada en el nivel superior, la medida de la radiación solar actual rad y las variables h y P_g (ver Fig. 3), a partir de las cuales se calculan las referencias del nivel inferior de control, que son: las variables discretas fc y s , que corresponden respectivamente al estado de la pila de combustible (donde 1 significa encendida y 0 parada) y al estado del interruptor (cuando el circuito está cerrado tomaría valor 1, y valor 0 al estar abierto); P_{fc} , la potencia dada por la pila de combustible; y P_e , la potencia desviada hacia el electroizador. Ya por último, el nivel inferior de control se corresponde con el controlador propio de cada equipo inividual, tales como de los adaptadores de potencia o los controladores de pila de combustible [5] y electroizador.

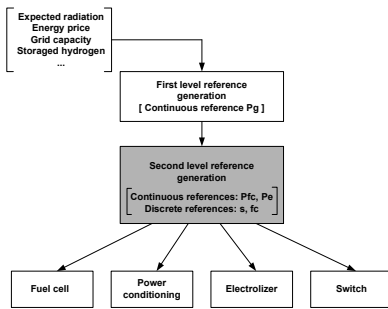


Figura 2: Escenario global de control

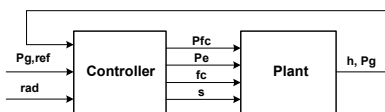


Figura 3: Segundo nivel de control

4. MODELO NO LINEAL

Como ya se ha discutido en una sección anterior, los equipos de acondicionamiento de potencia se omiten. Todos los modelos descritos en esta sección, por otra parte, y excepto el almacenamiento de hidrógeno, son considerados estáticos. Esta simplificación se hace en base a que las dinámicas más lentas corresponden a las tasas de producción y consumo de hidrógeno, mientras que las demás dinámicas son varios órdenes de magnitud más rápidas. La nomenclatura que se usa puede verse en la Tabla 1.

Cuadro 1: Nomenclatura

| | |
|----------------|---------------------------------------|
| A | área de membrana (m^{-2}) |
| F | constante de Faraday ($C mol^{-1}$) |
| G | radiación ($W m^{-2}$) |
| I | corriente (A) |
| n | número de celdas |
| P | potencia (W) |
| R | resistencia eléctrica (Ω) |
| T | temperatura (K) |
| V | voltaje (V) |
| W | caudal másico ($kg s^{-1}$) |
| Subíndices | |
| cons | consumido |
| e | electrolizador |
| ecell | celdas electrolizadoras |
| H ₂ | hidrógeno |
| max | máximo |
| n | nominal |
| oc | circuito abierto |
| p | conexión en paralelo |
| prod | producido |
| s | conexión en serie |
| sc | cortocircuito |
| scell | celdas solares |
| sf | campo solar |
| smod | módulos solares |
| T | efectos térmicos |

Las ecuaciones que representan el funcionamiento de los paneles solares aquí expuestas, se basan en [6]. Además, se hicieron algunas suposiciones importantes en la manera en que se discute en [7]. Así, el cálculo de las características del campo fotovoltaico puede hacerse directamente a partir de los datos suministrados por el fabricante (ver Tabla 2). Dichos datos se corresponden con el módulo comercial expuesto en [8].

La curva de polarización del campo solar puede escribirse como

$$I_{sf} = I_{sc,sf} \left[1 - \exp \left(\frac{V_{sf} - V_{oc,sf} + I_{sf} R_{sf}}{V_{T,sf}} \right) \right] \quad (1)$$

Cuadro 2: Características del módulo solar I-106/12 Isotofón

| Características físicas | |
|----------------------------------------------|------------------|
| Dimensión | 1304 x 648 mm |
| Peso | 9.8 kg |
| Número de celdas en serie | 36 |
| $(n_{s,smod})$ | |
| Número de celdas en paralelo | 2 |
| $(n_{p,smod})$ | |
| Características eléctricas | |
| Voltaje nominal $(V_{n,smod})$ | 12 V |
| Máxima potencia $(P_{max,smod})$ | 106 Wp \pm 5 % |
| Corriente de cortocircuito $(I_{sc,smod})$ | 6.54 A |
| Corriente a circuito abierto $(V_{oc,smod})$ | 21.6 V |
| Corriente a máxima potencia $(I_{max,smod})$ | 6.1 A |
| Volaje a máxima potencia $(P_{max,smod})$ | 17.4 V |

donde $V_{oc,sf} = V_{oc,smod} \cdot n_{s,sf}$. El parámetro R_{sf} , no suministrado por el fabricante, es calculado como se describe en [8]. El voltaje térmico $V_{T,sf}$ se expresa como

$$V_{T,sf} = V_{T,scell} \cdot n_{s,sf} \cdot n_{s,smod} \quad (2)$$

con

$$V_{T,scell} = \frac{K \cdot T_{scell}}{e} \quad (3)$$

Por último, la dependencia de la corriente $I_{sc,sf}$ con la radiación solar se calcula como

$$I_{sc,sf} = I_{sc,smod} \cdot n_{p,sf} \frac{G}{1000} \quad (4)$$

Las curvas de polarización expuestas en Fig. 4 son conseguidas implementando las ecuaciones de arriba y particularizando los parámetros con aquellos de la Tabla 2. Los módulos solares están compuestos por grupos de células solares, en el número indicado en Tabla 2. De la misma manera, el campo solar es el resultado de conectar los módulos solares en paralelo, y las ramas así formadas, en paralelo. Para conseguir una potencia pico de alrededor 3000 W, se necesitan 14 ramas en paralelo $(n_{p,sf})$, cada una de las cuales está compuesta por dos módulos en serie $(n_{s,sf})$.

Con respecto al electrolizador, las ecuaciones aquí presentadas se corresponden con las que aparecen en [9]. Sus principales características pueden verse en la Tabla 3

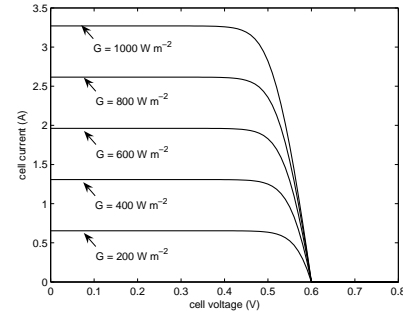


Figura 4: Curvas de polarización de la celda solar para diferentes niveles de radiación solar

Cuadro 3: Características del electrolizador alcalino MEKTON

| | |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Número de celdas en serie $(n_{s,e})$ | 20 |
| Voltaje de celda a circuito abierto $(V_{oc,ecell})$ | 0.95 V |
| Área de la membrana de celda (A_{ecell}) | 0.06 m ² |
| Resistencia serie de la celda $(R_{s,ecell})$ | $5.34 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m^2$ |
| Máxima producción de H ₂ $(W_{H_2,prod,max})$ | $2.5 \cdot 10^{-5} kg \cdot s^{-1}$ |

El consumo de energía por parte del electrolizador se calcula como

$$P_e = n_{s,e} \cdot V_{oc,ecell} \cdot A_e \frac{V_{ecell} - V_{oc,ecell}}{R_{s,e}} \quad (5)$$

De la misma manera, el voltaje del electrolizador se puede escribir como

$$V_e = n_{s,e} \left(\frac{I_e \cdot R_{s,ecell}}{A_{ecell}} + V_{oc,ecell} \right) \quad (6)$$

Por último, la producción de hidrógeno queda

$$W_{H_2} = 0,002 \frac{n_{s,e} \cdot I_e}{2F} \quad (7)$$

La dependencia de la tasa de producción de hidrógeno con el consumo de energía puede verse en Fig. 5. Nótese que resulta una dependencia casi lineal.

Además, en el modelo deben incluirse algunas restricciones funcionales. Así, el límite de consumo eléctrico del electrolizador es de 2500 W. Aparte, este consumo

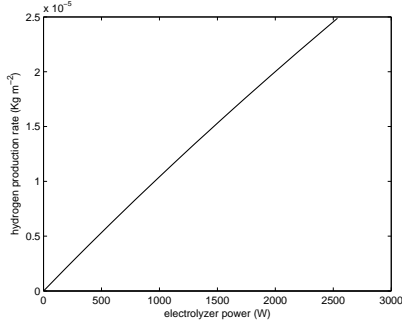


Figura 5: Producción de hidrógeno vs consumo del electrolizador

no puede nunca superar a la potencia disponible desde el campo solar (P_{av}). Por último, y debido a las limitaciones de capacidad de los depósitos de hidrógeno, cuando se alcanza el nivel superior de presión en ellos, el electrolizador debe parar de producir. Nótese que no se ha incluido ninguna variable discreta asociada con el estado del electrolizador (esto es, apagado o encendido). Esto se ha hecho para obtener un modelo más simplificado, y también se sustenta en el hecho de que el electrolizador en realidad nunca se deja aislado, sino que ha de estar siempre en tensión, para que no se degraden las celadas que lo componen. Es por esta razón que se considera que el electrolizador siempre está en el estado de encendido.

$$P_{e,\min} = 0 \leq P_e \leq 2500 = P_{e,\max} \quad (8)$$

$$P_e \leq P_{av} \quad (9)$$

$$[h \geq h_{\max}] \Rightarrow [P_e = 0] \quad (10)$$

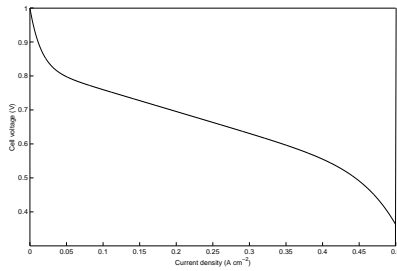


Figura 6: Curva de polarización de la pila de combustible

Ya respecto a la pila de combustible, la curva de polarización presentada en Fig. 6 se corresponde con la pila de combustible tipo PEM de 1.2 kW Nexa de la compañía Ballard. Dicha pila se compone de 46 celadas conectadas en serie, cada una con una superficie de membrana de 110 cm². El sistema es autohumidificado e incluye refrigeración por aire. El circuito de

hidrógeno está configurado en dead-end. En la Fig. 7 puede verse la curva de potencia neta dada por la pila en función de la tasa de consumo de hidrógeno.

De la misma manera que antes, el modelo debe incluir algunas restricciones funcionales importantes. Así, el límite de potencia que la pila de combustible puede dar es de 1200 W. Por otra parte, dado que la pila necesita de unos determinados tiempos para ser arrancada y parada, debe evitarse que el control cambie demasiado rápido su estado. Para esto, se incluyó un temporizador, estableciendo un tiempo mínimo de permanencia en encendido de la pila de 3 horas, y de 120 segundos para permitir su apagado. Hay que tener en cuenta además, que cuando la pila se encuentra encendida, aunque no esté suministrando potencia a red, está consumiendo una pequeña cantidad de hidrógeno, usada para producir la electricidad que los equipos auxiliares necesitan (alrededor de 35 W). Por esta razón, cuando se alcanza el nivel inferior de presión en los depósitos de hidrógeno, la pila debe ser apagada inmediatamente, aún no habiéndose cumplido la restricción arriba comentada de tiempo mínimo de permanencia en encendido. Todas estas restricciones se escriben como

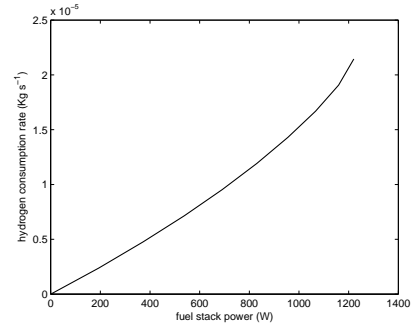


Figura 7: Potencia neta de la pila de combustible vs consumo de hidrógeno

$$P_{fc,\min} = 0 \leq P_{fc} \leq 1200 = P_{fc,\max} \quad (11)$$

$$[t_{fc,\text{off} \rightarrow \text{on}} \geq 120] \Rightarrow [fc = 1] \quad (12)$$

$$[t_{fc,\text{on} \rightarrow \text{off}} \geq 10800 \mid h \leq h_{\min}] \Rightarrow [fc = 0] \quad (13)$$

El depósito de hidrógeno se supuso con una capacidad de 125 L, con una presión máxima de 200 bar (lo que hace un total de aproximadamente 2 kg de hidrógeno). La presión inferior se fijó en 20 bar para no permitir que se vacíe totalmente. En términos de masa, las restricciones en el almacenamiento se expresan como:

$$h_{\min} = 0,2 \leq h \leq 1,8 = h_{\max} \quad (14)$$

5. MODELO HÍBRIDO PARA CONTROL

Debido a la presencia tanto de dinámicas continuas como de entradas binarias, se adoptará la teoría sobre sistemas híbridos para describir el proceso [10, 13]. Aunque hay varias maneras de expresar matemáticamente un sistema híbrido [14], adoptamos aquí la llamada formulación MLD (mixed logical dynamical model) [1]. El objetivo de la herramienta llamada HYSDEL descrita en [4], es la descripción a modo de programación de alto nivel del modelo, que luego traslada a lenguaje matemático, haciendo más fácil la obtención del modelo. Así, el modelo presentado en la sección anterior se transforma en un modelo MLD discreto equivalente siguiendo los pasos que se enumeran a continuación.

1. Se linealizan las ecuaciones no lineales. En lo que respecta al campo solar resulta la ecuación lineal que sigue:

$$P_{av} = m_1 \cdot rad = 2,9252 \text{ rad} \quad (15)$$

El electrolizador, como se ve en la Fig. 5, presenta un comportamiento casi lineal, así que la relación lineal que se presenta aproxima muy bien a la curva original (ver Fig. 8).

$$W_{H_2,prod} = m_2 \cdot P_e = 1,0018 \cdot 10^{-8} P_e \quad (16)$$

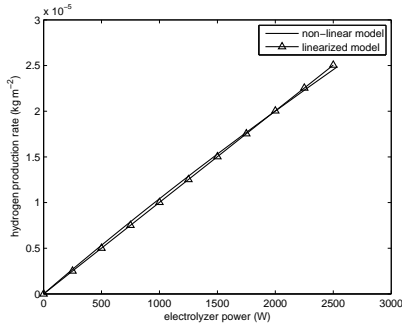


Figura 8: Linealización del electrolizador

De manera análoga, la pila de combustible se linealiza con la siguiente ecuación (véase también la Fig. 10):

$$P_{fc} = m_3 \cdot W_{H_2,cons} = 1,5267 \cdot 10^{-8} W_{H_2,cons} \quad (17)$$

2. El modelo se discretiza con un tiempo de muestreo de $T_s = 5$ s, y el modelo lineal a trozos

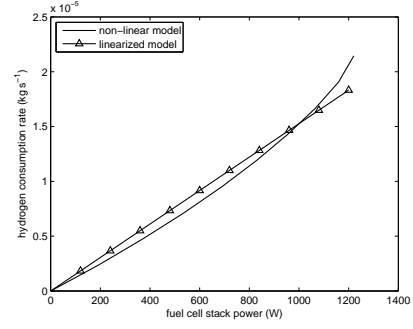


Figura 9: Linealización de la pila de combustible

PWA (piecewise affine model) se estructura dividiendo las dinámicas en cuatro modos de funcionamiento distintos, que son función de los estados del interruptor s y de la pila de combustible fc , según el autómata que se muestra en la Tabla 4.

Cuadro 4: Autómata

| s | fc | estado |
|---|----|--------|
| 0 | 0 | i_1 |
| 1 | 0 | i_2 |
| 0 | 1 | i_3 |
| 1 | 1 | i_4 |

Nombrando las variables continuas con el subíndice r y a las binarias con b , sea $x_r(t) = [h]$, $x_b(t) = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4]$, $y_r(t) = [h \ P_g]$, $u_r(t) = [P_e \ P_{fc} \ rad]$ y $u_b(t) = [s \ fc]$. También, $P_{fc,on} = 35$ W está relacionada con el consumo de los equipos auxiliares de la pila de combustible cuando está arrancada. Así, las dinámicas híbridas se escriben como:

$$\text{if } i_1(t) \text{ then } \begin{cases} x_r(t+1) = [m_2 & 0 & 0] u_r(t) \\ y_r(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x_r(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} u_r(t) \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{if } i_2(t) \text{ then } \begin{cases} x_r(t+1) = [m_2 & 0 & 0] u_r(t) \\ y_r(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x_r(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & m_1 \end{bmatrix} u_r(t) \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{if } i_3(t) \text{ then } \begin{cases} x_r(t+1) = [m_2 & -m_3 & 0] u_r(t) - m_3 \cdot P_{fc,on} \\ y_r(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x_r(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} u_r(t) \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{if } i_4(t) \text{ then } \begin{cases} x_r(t+1) = [m_2 & -m_3 & 0] u_r(t) - m_3 \cdot P_{fc,on} \\ y_r(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x_r(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & m_1 \end{bmatrix} u_r(t) \end{cases} \quad (21)$$

3. Por último, han de incluirse también todas las restricciones anteriormente comentadas, que pueden reescribirse de la manera que sigue:

$$h_{\min} \leq x_r(t) \leq h_{\max} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}' \leq u_r(t) \leq \begin{bmatrix} P_{e,\max} & P_{fc,\max} & rad_{\max} \end{bmatrix}' \quad (23)$$

$$u_{r1}(t) \leq m_1 \cdot u_{r3}(t) \quad (24)$$

$$[t_{fc,off \rightarrow on} \geq 120] \Rightarrow [u_{b2}(t) = 1] \quad (25)$$

$$[t_{fc,on \rightarrow off} \geq 10800 \mid x_r(t) \leq h_{\min}] \Rightarrow [u_{b2}(t) = 0] \quad (26)$$

$$[x_r(t) \geq h_{\max}] \Rightarrow [u_{b1}(t) = 0] \quad (27)$$

El compilador HYSDEL [4] transforma entonces todas estas dinámicas híbridas y restricciones en forma MLD:

$$x(t+1) = A x(t) + B_1 u(t) + B_2 \gamma(t) + B_3 z(t) \quad (28a)$$

$$y(t) = C x(t) + D_1 u(t) + D_2 \gamma(t) + D_3 z(t) \quad (28b)$$

$$E_2 \gamma(t) + E_3 z(t) \leq E_1 u(t) + E_4 x(t) + E_5 \quad (28c)$$

donde $x = [x_r \ x_b]'$, $y = [y_r \ y_b]'$, $u = [u_r \ u_b]'$, $y \delta \in \{0,1\}^{r_b}$ y $z \in \mathfrak{R}^{r_r}$ representan variables auxiliares lógicas y continuas.

6. FORMULACIÓN DEL CONTROLADOR HÍBRIDO MPC CON RESTRICCIONES

El control híbrido MPC se ha formulado con éxito en numerosas aplicaciones industriales [15, 16, 17, 18]. El problema de control es formulado como sigue:

$$\begin{aligned} \min_{\{u, \delta, z\}_0^{N-1}} J(\varepsilon, x(t)) &= \sum_{k=0}^N (\|R(u_k - u_{ref})\|_{\infty} + \|Q(y_k - y_{ref})\|_{\infty}) \\ &+ \sum_{k=1}^{N-1} (\|S(x_k - x_{ref})\|_{\infty} + \|S_T(x_N - x_{ref})\|_{\infty}) \quad (29a) \end{aligned}$$

sujeto a

$$\begin{cases} x_0 = x(t) \\ x_{k+1} = A x_k + B_1 u_k + B_2 \gamma_k + B_3 z_k \\ y_k = C x_k + D_1 u_k + D_2 \gamma_k + D_3 z_k \\ E_2 \gamma_k + E_3 z_k \leq E_1 u_k + E_4 x_k + E_5 \end{cases} \quad (29b)$$

donde N es el horizonte de control, $x(t)$ es el estado del sistema MLD en el instante t , $\varepsilon = [u_0, \gamma_0, z_0, \dots, u_{N-1}, \gamma_{N-1}, z_{N-1}]$ es el vector de optimización y Q , R , S y S_T son las matrices de pesos. Nótese que hay dos referencias fijas, x_{ref} y y_{ref} , que junto con las matrices de pesos elegidas, resultan en un controlador MPC multiobjetivo por pesos. Así, el principal objetivo de control es el seguimiento de la referencia y_{ref} usando la fuente de energía primaria (esto es, el campo solar) siempre que esa posible. Si o bien las restricciones o bien la radiación solar del momento imposibilitan dicho objetivo, se utiliza entonces la fuente de energía secundaria (la pila de combustible). Además, siempre que haya energía generada por el campo solar que no vaya a ser vertida a red, se utilizará para electrolizar agua y producir hidrógeno que almacenar.

$$y_{ref} = \begin{bmatrix} 0 & P_{g,ref} \end{bmatrix}' \quad (30)$$

$$x_{ref} = \begin{bmatrix} h_{\max} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}' \quad (31)$$

$$u_{ref} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}' \quad (32)$$

donde las matrices de pesos son

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad S_T = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Presentamos en este apartado dos pruebas diferentes del modelo. Así, las simulaciones se han planeado para

mostrar el comportamiento del controlador en un rango lo más amplio posible de situaciones, haciendo hincapié especialmente en las situaciones en que se alcanzan las restricciones. La primera simulación se presenta en las Figs. 10 y 11.

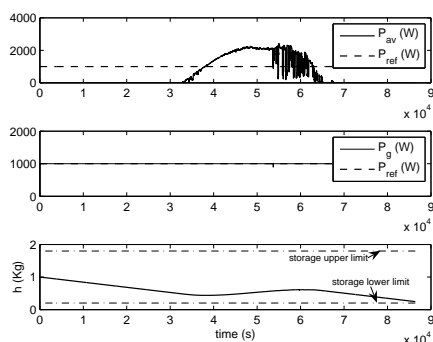


Figura 10: Referencia del experimento (a) y variables de salida del modelo

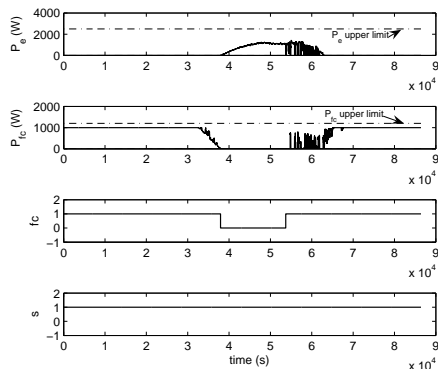


Figura 11: Variables de entrada del modelo del experimento (a)

La potencia generada por el campo solar se obtuvo a partir de datos reales de radiación solar correspondientes a un día completo. Como puede observarse, P_{ref} se mantuvo en un nivel constante de 1000 W. En la primera fase del experimento, cuando no hay energía disponible desde el campo solar, la pila de combustible es entonces arrancada para proporcionar los 1000 W de la referencia. Como resultado, la cantidad de hidrógeno almacenado cae a medida que va siendo consumido. Hacia la mitad del experimento, cuando la potencia disponible aumenta, la pila de combustible va gradualmente generando menos potencia, estando al mismo tiempo el interruptor cerrado y permitiendo así que la energía sea vertida a red desde el campo solar (lo que es claramente más eficiente). Cuando el valor de P_{av} se sitúa por encima de los 1000 W, la pila de combustible es apagada (nótese que la restricción de 3 horas de período de funcionamiento mínimo está cumplida) y el electrolizador empieza a consumir

la energía sobrante de los paneles fotovoltaicos para producir hidrógeno. Obsérvense también en una etapa posterior las fluctuaciones en la radiación solar. Para mantener constante la potencia vertida a red, la pila de combustible es arrancada, proporcionando los picos de potencia que no es capaz de suministrar el campo solar, y permaneciendo encendida aún cuando no inyecta potencia, para no estar continuamente cambiando de estado, lo que se consigue con la consabida restricción del temporizador. La etapa final es análoga a la primera, cuando no existía potencia generada por los paneles fotovoltaicos.

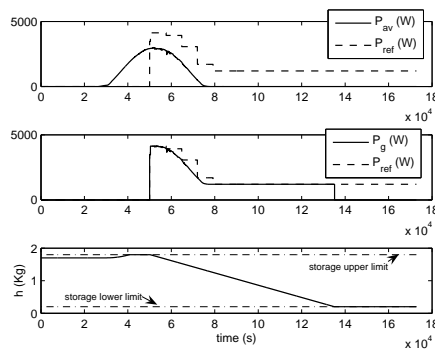


Figura 12: Referencia del experimento (b) y variables de salida del modelo

La segunda simulación muestra en las Figs. 12 y 13. Ahora, P_{ref} ya no es constante, Así, en una primera etapa, se ajusta a 0. Cuando P_{av} crece, esta potencia extra se utiliza en el electrolizador para producir hidrógeno. Obsérvense sin embargo que cuando se alcanza el límite superior de capacidad del tanque de hidrógeno, el electrolizador, aún encendido, se deja sin consumo de energía y por tanto a producción de hidrógeno nula, para no violar dicha restricción del depósito. En ese momento, como como la potencia generada por el campo solar no está siendo consumida por el electrolizador y la red no admite energía, el interruptor abre el circuito y deja aislado al campo fotovoltaico. En la etapa que sigue, la referencia aumenta hasta situarse en 4000 W. Para seguirla, el interruptor cierra el circuito conectando así los paneles fotovoltaicos a red y la pila de combustible es arrancada, entregando su máximo de 1200 W. Como puede verse, durante toda esta etapa la referencia no puede ser completamente seguida porque ni aún con la pila encendida y dando su máximo, su suma con la energía del campo solar no alcanza a suministrar los 4000 W. En la última etapa, cuando no hay potencia generada por el campo fotovoltaico, la pila permanece encendida a 1200 W. Como resultado, la cantidad de hidrógeno almacenado va disminuyendo, hasta que el límite inferior del depósito se alcanza y la restricción hace que se apague. Como resultado de no haber ni hidrógeno ni energía solar disponible, la referencia no puede ser seguida en esta última parte de la simulación.

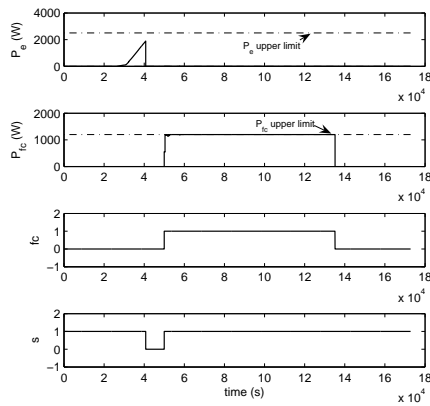


Figura 13: Variables de entrada del modelo del experimento (b)

8. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado el modelo híbrido de una planta generadora de energía con dos generadores: células fotovoltaicas y pila de combustible. Basado en la teoría de sistemas híbridos recientemente desarrollada, se diseñó un controlador predictivo híbrido. Las simulaciones del sistema muestran que el seguimiento de la referencia se hace muy fielmente, respetando todas las restricciones impuestas. Al mismo tiempo, el controlador busca el plan más eficiente en cada momento, que básicamente se traduce en el aprovechamiento del campo solar toda vez que sea viable y en la producción de hidrógeno al existir energía sobrante.

Referencias

- [1] A. Bemporad and M. Morari, "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints", *Automatica*, vol. 35, no. 3, pp. 407–427, Mar. 1999
- [2] F. Borrelli, *Constrained Optimal Control of Linear and Hybrid Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2003, vol. 290, Lecture Notes in Control and Information Sciences
- [3] F. Borrelli, M. Baotic, A. Bemporad, and M. Morari, "Dynamic programming for constrained optimal control of discrete-time hybrid systems", *Automatica*, vol. 41, no. 1, pp. 1709–1721, Jan. 2005
- [4] F.D. Torrisi and A. Bemporad, "HYSDEL—A tool for generating computational hybrid models", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 235–249, Mar. 2004
- [5] C. Bordons, A. Arce, and A. del Real, "Constrained Predictive Control Strategies for PEM fuel cells", *IEEE proceedings of 2006 American Control Conference*, 2006
- [6] M.C. Alonso García, "Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica", *Serie Ponencias, Editorial Ciemat*, 2003

- [7] M.A. Green, *Solar cells. Operating principles, Technology and System Applications*. Prentice Hall, New Jersey, 1982
- [8] J.D. Aguilar, G. Nofuentes, J. Marín, J.C. Hernández, F.J. Muñoz, and E. Guzmán, *Estudio de la célula solar con ayuda de simulador PSPICE y de medidas de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino a sol real*, Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior publications, 2003
- [9] A. Molina, *Development of simulation tools for renewable energy systems*, Msc Thesis, University of Seville, 2003
- [10] P.J. Antsaklis, "A brief introduction to the theory and applications of hybrid systems," in *Proc. IEEE, Spec. Issue Hybrid Syst.: Theory Appl.*, Jul. 2000, vol. 88, no. 7, pp. 879–886
- [11] J. Lygeros, C. Tomlin, and S. Sastry, "Controllers for reachability specifications for hybrid systems," *Automatica*, vol. 35, no. 3, pp. 349–370, 1999
- [12] K. Gokbayrak and C.G. Cassandras, "A hierarchical decomposition method for optimal control of hybrid systems," in *Proc. 38th IEEE Conf. Decis. Control*, Phoenix, AZ, Dec. 1999, pp. 1816–1821
- [13] M.S. Branicky, "Studies in hybrid systems: Modeling, analysis, and control" Ph.D. dissertation, LIDS–TH 2304, Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, 1995.
- [14] W.P.M.H. Heemels, B. De Schutter, and A. Bemporad, "Equivalence of hybrid dynamical models," *Automatica*, vol. 37, no. 7, pp. 1085–1091, Jul. 2001
- [15] F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor, and D. Hrovat, "An MPC/hybrid system approach to traction control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 541–552, 2006
- [16] N. Giorgetti, A. Bemporad, H.E. Tseng, and D. Hovrat, "Hybrid model predictive control application towards optimal semi-active suspension," *Int. J. Control*, vol. 79, no. 5, pp. 521–533, 2006
- [17] S. Di Cairano, A. Bemporad, I. Kolmanovsky, and D. Hovrat, "Model predictive control of nonlinear mechatronic systems: An application to a magnetically actuated mass spring damper," in *Proc. 2nd IFAC Conf. Anal. Des. Hybrid Syst.*, Alghero, Italy, 2006, pp. 241–246
- [18] N. Giorgetti, G. Ripaccioli, A. Bemporad, I. Kolmanovsky, and D. Hovrat, "Hybrid model predictive control of direct injection stratified charge engines", *IEEE/ASME Trans. on mechatronics*, vol. 11, no. 5, Oct. 2006