

Nonlinear Voltage Regulation for a Fuel Cell/Battery/Supercapacitor System

C. A. Beltrán-González* L. H. Diaz-Saldierna**
J. Leyva-Ramos** V. M. Ramírez-Rivera***
P. R. Martínez-Rodríguez* D. Langarica-Córdoba*

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México (e-mail:diego.langarica@uaslp.mx).

** Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San
Luis Potosí, S.L.P. México

*** Centro de Investigación Científica de Yucatán, Yucatán, México

Abstract: The present work focuses on the voltage regulation of a DC bus despite instantaneous load changes on a system composed of fuel cell energy generation and hybrid energy storage. The objective is to properly share the power demand between its sources, i.e. fuel cell, supercapacitor, and a battery bank meanwhile fuel cell starvation phenomenon is avoided. Consequently, an adaptive nonlinear controller is designed based on two control loops. The inner loop focuses on current dynamics and its objective is current tracking. The outer loop focuses on the voltage dynamics and its objective is voltage regulation through current tracking generation. Additionally, an adaptation law based on immersion and invariance theory is designed to enhance the closed-loop system behavior through load approximation. Finally, simulations results show the correct performance of the adaptive nonlinear multi-loop controller when sudden load changes are considered.

Keywords: Nonlinear control, renewable energy systems, PEMFC, adaptive control, power electronics.

1. INTRODUCCIÓN

Una celda de combustible (FC, por sus siglas en inglés), genera energía eléctrica mediante una reacción electroquímica, combinando un combustible (hidrógeno) y un oxidante (oxígeno). Como esta reacción tiene un alta eficiencia y sus residuos son agua y calor; se consideran uno de los dispositivos de generación de energía limpia de la siguiente generación, Dicks and Rand (2018) y Wang et al. (2020b). Entre los múltiples tipos de FC se encuentran las de membranas de intercambio protónico (PEMFC, de sus siglas en inglés); respecto a las demás, tienen como ventajas una mayor eficiencia (hasta el 75 %), baja temperatura de operación (entre -40 a 180 °C), y aplicaciones en sistemas de baja, media, y alta potencia. Algunas de las cuales son los vehículos eléctricos con FC (FCEV, de sus siglas en inglés), trenes eléctricos y sistemas domésticos de generación eléctrica. Las desventajas que presentan las celdas de combustible tipo PEMFC son la alta relación no lineal entre el voltaje de salida y la corriente demandada, una dinámica lenta, y el fenómeno falta de combustible (fuel starvation). Este fenómeno lo experimenta la PEMFC cuando suministra variaciones rápidas de corriente; provoca una caída en su voltaje de salida, y disminuye su vida útil, Das et al. (2017), Zúñiga-

Ventura et al. (2018), Ogungbemi et al. (2019), Kong et al. (2019) y Wang et al. (2020b).

Los sistemas de generación de energía (EGS, de sus siglas en inglés) con base en PEMFC, emplean un convertidor CD-CD elevador para elevar el voltaje de salida; sistemas de almacenamiento de energía (ESS, de sus siglas en inglés), con base en supercapacitores (SC) y/o baterías (BT) para mejorar la respuesta dinámica al suministrar potencia instantánea y/o alta; además de algoritmos de control para asegurar un voltaje regulado y una correcta operación del sistema, Baset et al. (2020). El sistema bajo análisis se compone de un módulo PEMFC de 1.2 kW; un banco de SC de 12.5 F a 32.4 V, con corriente máxima de 40 A, y un banco de baterías ácido-plomo de 24 V a 99 Ah.

La contribución de este trabajo es el diseño de un esquema de control para un sistema compuesto por un EGS y un ESS híbrido, asegura una correcta regulación del voltaje del bus de CD y evita una demanda indeseada de energía al módulo de PEMFC. Cabe resaltar que este trabajo de investigación se presenta como una extensión del trabajo de Zúñiga-Ventura et al. (2018) donde se considera un EGS compuesto sólo por un módulo PEMFC y un ESS por SC.

Este documento se organiza de la siguiente forma: Se describen el diagrama eléctrico, el modelado matemático, y simplificaciones en el modelado en la sección 2. El esquema de control multilazo, la separación de las dinámicas entre voltajes y corrientes, el diseño del lazo interno y externo, y la ley de adaptación se detallan en la sección 4. En la sección 5 se verifica el desempeño del esquema de control mediante simulación numérica, el análisis comprende cuando funciona o no la ley de adaptación. Por último, en la sección 6 se presentan las conclusiones de la investigación.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

El sistema bajo análisis se presenta en la Fig. 1. Se compone de un EGS basado en PEMFC; un ESS híbrido, de BT, y SC; tres convertidores CD-CD que se conecta en paralelo, uno elevador, y dos elevador-reductor bidireccionales, y una carga eléctrica de CD. Los modos de operación del sistema son, Zúñiga-Ventura et al. (2018) y Faraji and Farzanehfard (2020):

- Entrega: EGS suministra la demanda de la carga.
- Apoyo: EGS y ESS suministran la demanda la carga.
- Carga: EGS suministra energía al ESS.
- Recuperación: la carga suministra energía al ESS.

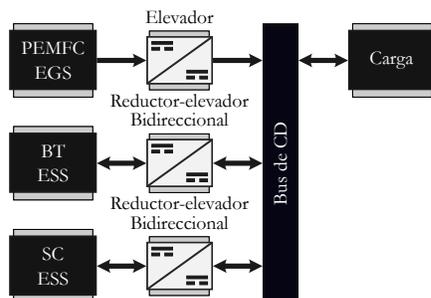


Fig. 1. Topología del sistema propuesto.

El comportamiento dinámico del sistema propuesto, se caracteriza con base al diagrama eléctrico de la Fig. 2. Con la intención de facilitar el modelado del sistema y en consecuencia el diseño del controlador, se considera al SC como un capacitor ideal. Adicionalmente, se asume que cada variable de estado es medible; todos los parámetros del sistema son conocidos exceptuando la carga R_L ; los dispositivos de conmutación son ideales, y cada convertidor CD-CD opera en modo de conducción continuo (CCM, de sus siglas en inglés). Las variables de estado son: corrientes en las inductancias $i_{L_{FC}}$, i_{BT} , i_{SC} ; voltajes en los capacitores v_{FC} , v_{SC} , v_O , y batería v_{BT} . El convertidor elevador se controla con el dispositivo de conmutación S_1 a través de la señal de control u_{FC} y los bidireccionales con los dispositivos de conmutación $S_{2,3,4,5}$ a través de las señales de control $u_{2,3,4,5}$. Las señales pares controlan el modo elevador y las impares el modo reductor. Se agrega un diodo a la salida de la celda de combustible D_{FC} para evitar un flujo de energía hacia

el módulo PEMFC. Por último, la carga se representa por una resistencia variable y se denota por R_L .

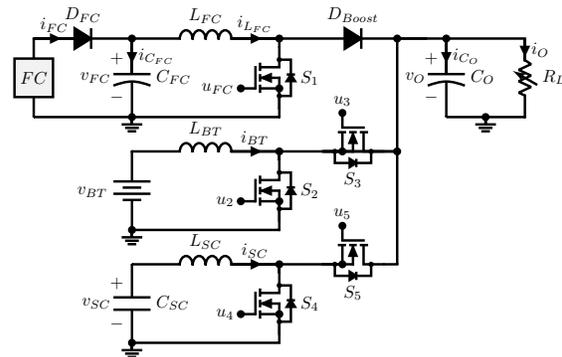


Fig. 2. Diagrama eléctrico del sistema propuesto.

En primer lugar, el comportamiento eléctrico de la PEMFC se modela con base en su curva de polarización, i.e. la relación entre la corriente demandada y el voltaje de salida. Se emplea el modelo estático de Zúñiga-Ventura et al. (2018), este modelo comprende las tres zonas de operación de la celda de combustible, activación, óhmica, y transportación, además del fenómeno de histéresis. Requiere tres parámetros que se obtienen con los datos experimentales de voltaje y corriente del módulo. El modelo se describe por:

$$v_{FC}(i_{FC}) = -ai_{FC}^b + c, \quad (1)$$

donde v_{FC} es el voltaje de salida, i_{FC} es la corriente de salida, mientras que los parámetros a , b , y c se obtienen de una caracterización experimental y dependen de las condiciones de humidificación, temperatura, y presión de los gases de entrada. La curva de polarización (1) que describe el módulo PEMFC se presenta en la Fig. 3.

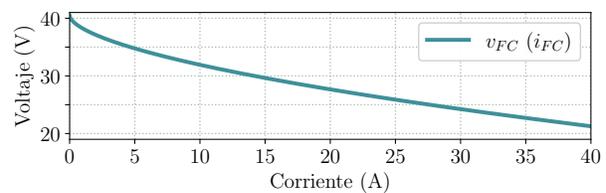


Fig. 3. Curva de polarización del módulo PEMFC.

A continuación se modela el banco de baterías. La corriente se define positiva cuando se suministra energía (descarga) y negativa cuando la almacena (carga). Su comportamiento se modela con un circuito eléctrico equivalente (EEC, de sus siglas en inglés). El modelado EEC imita el comportamiento dinámico de la BT con base en arreglos de componentes eléctricos como capacitores, resistencias, y fuentes de voltaje, Wang et al. (2020a). Se emplea el modelo de la resistencia interna, como se observa en la Fig. 4. Con base en la ley de voltajes de Kirchhoff, se obtiene:

$$v_{BT} = v_{OC} - (R_{int} + K(SoC))i_{BT} \quad (2)$$

donde: v_{BT} es el voltaje que suministra la BT; v_{OC} , R_{int} , $K(SoC)$ e i_{BT} , son el voltaje a circuito abierto, la

resistencia interna, un parámetro que depende del estado de carga (SoC, de sus siglas en inglés), y la corriente que suministra la BT, respectivamente. El SoC de la batería se calcula con el conteo de Coulomb:

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{1}{Q_0} \int_{t_0}^t i_{BT} d\tau \quad (3)$$

donde: Q_0 y $SoC(t_0)$ son: capacidad nominal en Ah y carga inicial, respectivamente.

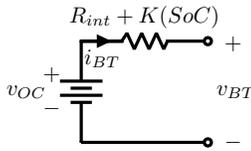


Fig. 4. Modelo EEC de resistencia interna de una batería.

Se modelan los convertidores CD-CD con base en las leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff, cuando los dispositivos de conmutación se encuentran tanto encendidos como apagados. Consecuentemente, se usa el modelo promediado para representar la dinámica del sistema, i.e. se desprecia el rizo que produce la acción de conmutación, lo que define que cada señal de control (ciclo de trabajo de los convertidores) se encuentre en el intervalo $(0, 1)$. Por último, al combinar los convertidores, fuentes de energía, y la carga se obtiene el sistema dinámico:

$$\begin{aligned} C_{FC} \frac{dv_{FC}}{dt} &= \left(\frac{v_{FC} - c}{a} \right)^{1/b} - i_{L_{FC}} \\ L_{FC} \frac{di_{L_{FC}}}{dt} &= v_{FC} - v_O(1 - u_{FC}) \\ L_{BT} \frac{di_{BT}}{dt} &= v_{BT} - v_O u_{BT} \\ C_{SC} \frac{dv_{SC}}{dt} &= -i_{SC} \\ L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} &= v_{SC} - v_O u_{SC} \\ C_O \frac{dv_O}{dt} &= -\frac{v_O}{R_L} + i_{L_{FC}}(1 - u_{FC}) + \dots \\ &\quad + i_{BT} u_{BT} + i_{SC} u_{SC} \end{aligned} \quad (4)$$

donde se definen las señales de control de cada ESS como:

$$\begin{aligned} u_{BT} &= (1 - u_2)k_1 + u_3(1 - k_1) \\ u_{SC} &= (1 - u_4)k_2 + u_5(1 - k_2) \end{aligned} \quad (5)$$

donde k_i con $i=1,2$ es una señal binaria y define el modo elevador si $k_i = 1$ y el modo reductor si $k_i = 0$. Si se analiza el sistema dinámico (4) en el estado estacionario, i.e. cuando las señales de control son constantes, es decir $u_{FC} = \bar{u}_{FC}$, $u_{BT} = \bar{u}_{BT}$ y $u_{SC} = \bar{u}_{SC}$, los puntos de equilibrio ($\bar{\cdot}$) para las variables de estado son:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{FC} &= \bar{v}_O(1 - \bar{u}_1) \\ \bar{i}_{L_{FC}} &= \left(\frac{\bar{v}_{FC} - c}{a} \right)^{1/b} \\ \bar{i}_{BT} &= \gamma \\ \bar{v}_{SC} &= \bar{v}_O \bar{u}_{SC} \\ \bar{i}_{SC} &= 0 \\ \bar{v}_O &= R_L(\bar{i}_{L_{FC}}(1 - \bar{u}_{FC}) + \bar{i}_{BT} \bar{u}_{BT}). \end{aligned} \quad (6)$$

como se observa, el punto equilibrio de i_{BT} no depende de parámetros del sistema; se elige de forma externa y depende de las características del banco de baterías. Los demás puntos de equilibrio dependen del conocimiento de R_L , por lo que no es posible usar esta información con propósitos de retroalimentación.

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR ADAPTABLE MULTILAZO

En este trabajo de investigación se diseña un controlador no lineal que garantiza la regulación del valor de v_O a un valor deseado; preserva el voltaje del SC, y asegura variaciones suaves en $i_{L_{FC}}$ a pesar de cambios instantáneos en la carga. El sistema dinámico (4) combina la dinámica de tres tipos de fuentes de energía con convertidores electrónicos de potencia, y en consecuencia es posible identificar dos tipos de dinámicas; una rápida asociada con las corrientes de los inductores y una lenta relacionada con los voltajes de los capacitores. Este tipo de separación de dinámicas debido a la escala de tiempo es ampliamente usada en la literatura. Permite diseñar controladores tanto para la corriente como para el voltaje de forma separada, sin afectar el rendimiento en lazo cerrado, Zúñiga-Ventura et al. (2018) y Kong et al. (2019). De forma teórica, esta separación se fundamenta en el principio de perturbación singular descrito en Khalil (2002).

3.1 Lazo interno de control

El objetivo del lazo es asegurar el correcto seguimiento entre las corrientes de (4) y las trayectorias generadas por el lazo externo. Para este fin, se considera que cada variable de estado de voltaje permanece constante. En este caso, se definen las señales de error de corriente como:

$$\begin{aligned} x_1 &:= i_{L_{FC}} - i_{L_{FC}}^* \\ x_2 &:= i_{BT} - i_{BT}^* \\ x_3 &:= i_{SC} - i_{SC}^* \end{aligned} \quad (7)$$

donde $i_{L_{FC}}^*$, i_{BT}^* , i_{SC}^* son las corrientes de referencia generadas por el lazo externo de voltaje. La dinámica de los errores (7) se computa como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L_{FC}} (v_{FC} - v_O(1 - u_{FC})) - i_{L_{FC}}^* \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L_{BT}} (v_{BT} - v_O u_{BT}) - i_{BT}^* \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_{SC}} (v_{SC} - v_O u_{SC}) - i_{SC}^* \end{aligned} \quad (8)$$

por lo que si se eligen las señales de control de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} u_{FC} &= 1 + \frac{1}{v_O} (L_{FC}(i_{LFC}^* - \alpha_1 x_1) - v_{FC}) \\ u_{BT} &= \frac{1}{v_O} (v_{BT} - L_{BT}(i_{BT}^* - \alpha_2 x_2)) \\ u_{SC} &= \frac{1}{v_O} (v_{SC} - L_{SC}(i_{SC}^* - \alpha_3 x_3)) \end{aligned} \quad (9)$$

donde α_1 , α_2 , y α_3 son ganancias de control a ser seleccionadas, en consecuencia, la dinámica del error (8) se convierte en el sistema lineal invariante en el tiempo:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Por lo tanto, si $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 > 0$ entonces se asegura la convergencia asintótica del error al origen cuando el tiempo tiende a infinito, por lo que se cumple el objetivo de control, i.e. $i_{LFC} = i_{LFC}^*$, $i_{BT} = i_{BT}^*$, y $i_{SC} = i_{SC}^*$. En caso de contar con incertidumbres en el valor de las inductancias; se debe asegurar que se cumpla el CCM en cada convertidor; además, como su valor no influye en los puntos de equilibrio, se plantea que la correcta sintonización de los parámetros de control permite el correcto seguimiento de corrientes.

3.2 Lazo externo de control

El objetivo del lazo es garantizar una regulación de voltaje en la carga. Para este fin, se considera que cada variable de estado de corriente ya alcanzó su trayectoria de referencia, es decir que x_1, x_2 , y $x_3 = 0$; en caso contrario, la correcta regulación de voltajes no se puede asegurar. En esta etapa de diseño, se sintetizan las corrientes de referencia en función de los errores de voltaje. Para este fin, se definen las señales de error de voltaje como:

$$\begin{aligned} x_4 &:= v_{FC} - v_{FC}^* \\ x_5 &:= v_{SC} - v_{SC}^* \\ x_6 &:= v_O - v_O^* \end{aligned} \quad (11)$$

donde v_{FC}^* , v_{SC}^* y v_O^* representan valores deseados constantes para el módulo PEMFC, el SC, y el voltaje de salida, respectivamente. La dinámica del error de voltaje es en consecuencia:

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= -g(x_4) \\ \dot{x}_5 &= -\frac{i_{SC}^*}{C_{SC}} \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{C_O} \left(-\frac{v_O}{R_L} + i_{LFC}^* \frac{v_{FC}}{v_O} + i_{BT}^* \frac{v_{BT}}{v_O} + \dots \right. \\ &\quad \left. + i_{SC}^* \frac{v_{SC}}{v_O} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

donde la función $g(x_4)$ se define como:

$$g(x_4) = \frac{1}{C_{FC}} \left(i_{LFC}^* - \left(\frac{x_4 + v_{FC} - c}{a} \right)^{1/b} \right) \quad (13)$$

la cual representa una función impar que satisface que $g(0) = 0$ y $g(x_4)x_4 > 0$ cuando $x_4 \neq 0$, Zúñiga-

Ventura et al. (2018). Si se generan las trayectorias de las corrientes como:

$$\begin{aligned} i_{LFC}^* &= \frac{v_O}{v_{FC}} \left(\frac{v_O}{R_L} - i_{BT}^* \frac{v_{BT}}{v_O} - i_{SC}^* \frac{v_{SC}}{v_O} + \dots \right. \\ &\quad \left. - C_o(\beta x_5 + \alpha_5 x_6) \right) \\ i_{SC}^* &= C_{SC} (\alpha_4 x_5 - \beta x_6) \end{aligned} \quad (14)$$

donde α_4 , α_5 , y β son ganancias de control, entonces la dinámica del error (12) se convierte en:

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= -g(x_4) \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\alpha_4 & \beta \\ -\beta & -\alpha_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

Nótese que a diferencia de i_{LFC}^* y i_{SC}^* , la señal de referencia i_{BT}^* queda en función de algún valor fijo que asegure la correcta carga y descarga del banco de baterías. Considere que no se definió un error de voltaje para las baterías, ya que no se desea controlar el voltaje sino solamente la corriente. Dicho valor para la referencia i_{BT}^* , normalmente proviene de un sistema de gestión de energía que optimiza el uso de las fuentes para asegurar algún criterio económico o energético. El estudio de este sistema de gestión de energía se encuentra fuera del alcance de este trabajo de investigación. Sin embargo, en trabajos como, Rezk et al. (2021) detallan este tipo de sistemas.

El cumplimiento de los objetivos de control de este lazo se garantizan mediante un análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov. En este caso, se propone la función candidata de Lyapunov:

$$V(x_4, x_5, x_6) = \int_0^{x_4} g(y) dy + \frac{1}{2} (x_5^2 + x_6^2) \quad (16)$$

que satisface $V(0, 0, 0) = 0$ y que $V(x_4, x_5, x_6) > 0$, $\forall t \geq 0$. Al calcular la derivada en el tiempo de (16) a lo largo de las trayectorias de (15), se tiene: $\dot{V}(x_4, x_5, x_6) = -g(x_4)^2 - \alpha_4 x_5^2 - \alpha_5 x_6^2$. Si $\alpha_4, \alpha_5 > 0$ entonces se asegura la convergencia asintótica de los errores de voltaje al origen cuando el $t \rightarrow \infty$. Por lo que se cumple el objetivo de control, i.e. $v_{FC} = v_{FC}^*$, $v_{SC} = v_{SC}^*$ y $v_O = v_O^*$. Nótese que el controlador no requiere el uso de v_{FC}^* , ni tampoco se controla directamente v_{FC} , sino que naturalmente v_{FC} llega a su equilibrio, conforme los errores de voltaje se desvanecen en el origen. Finalmente, la generación de la referencia de corriente i_{LFC}^* en (14) depende del conocimiento de la resistencia de carga R_L ; sin embargo, este parámetro en la práctica es desconocido, por lo que en la siguiente sección se diseña una ley de adaptación para aproximar R_L y usar esta información en (14).

3.3 Ley de adaptación

Con el fin de garantizar robustez el lazo externo de control, se estima el valor de R_L a través de la estimación directa de la conductancia $\theta = 1/R_L$ con una ley de adaptación basada en la teoría de I&I, Astolfi et al. (2007). Con este fin, se define el error de estimación como:

$$z := \hat{\theta} - \theta \quad (17)$$

donde acorde a la teoría de I&I, la estimación $\hat{\theta}$ se compone de la suma de un término integral ξ y uno proporcional $\eta(v_O)$, i.e.:

$$\hat{\theta} = \xi + \eta(v_O). \quad (18)$$

Nótese que en general no existe información previa sobre la derivada de la incertidumbre δ , por lo que es razonable suponer que $\dot{\delta} = 0$, lo que implica que la incertidumbre varía lentamente con respecto a la dinámica del estimador. En este sentido, se asume θ constante, por lo que la dinámica de (17) es: $\dot{z} = \dot{\xi} + \frac{\partial \eta}{\partial v_O} \dot{v}_O$.

Al sustituir la dinámica de v_O de (4) y considerar θ , se obtiene:

$$\dot{z} = \dot{\xi} + \frac{1}{C_O} \frac{\partial \eta}{\partial v_O} \left(i_{LFC}(1 - u_{FC}) + i_{BT}u_{BT} + \dots + i_{SC}u_{SC} - \theta v_O \right). \quad (19)$$

Por otro lado, se incorpora $\hat{\theta}$ en (19) a través de la relación (17). A continuación se separan los términos que se relacionan directamente al error z :

$$\dot{z} = \dot{\xi} + \frac{1}{C_O} \frac{\partial \eta}{\partial v_O} \left(i_{LFC}(1 - u_{FC}) + i_{BT}u_{BT} + i_{SC}u_{SC} - \hat{\theta}v_O \right) + \frac{1}{C_O} \frac{\partial \eta}{\partial v_O} z v_O. \quad (20)$$

Finalmente, si se eligen la ley de adaptación y el término proporcional como:

$$\dot{\xi} = -\frac{1}{C_O} \frac{\partial \eta}{\partial v_O} \left(i_{LFC}(1 - u_{FC}) - \hat{\theta}v_O + \dots + i_{SC}u_{SC} + i_{BT}u_{BT} \right) \quad (21)$$

$$\eta(v_O) = -\sigma C_O v_O,$$

donde σ es la ganancia del estimador, entonces la dinámica del error (20) se convierte en el sistema: $\dot{z} = -\sigma v_O z$, donde por definición $v_O > 0$, y si $\sigma > 0$ entonces se asegura la convergencia asintótica del error al origen cuando $t \rightarrow \infty$. Por lo que se cumple el objetivo de la ley de adaptación, i.e. $\hat{\theta} = \theta$.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema propuesto en lazo cerrado con el controlador no lineal (9), (14), (21), y (18); se realizan simulaciones numéricas considerando que el EGS siempre suministra energía, cambios abruptos en la resistencia de carga cada 20 s, añadiendo una inductancia de 100 μ H a la carga, y el resultado de no emplear la ley de adaptación los últimos 40 s. En este caso, se consideran los valores presentes en la tabla 1. Como se observa, el parámetro K se considera constante debido al breve periodo de la simulación. Bajo este escenario se desea mantener los voltajes regulados, v_O en 48 V y v_{SC} en 24 V, mientras que la carga se varía entre 5 y 10 Ω . La generación de referencia de i_{BT} se define como:

$$i_{BT}^*(t) = \begin{cases} 5, & t < 60 \\ -0.5(60 - t) + 5, & t \in [60, 80] \\ -5, & t > 80 \end{cases} \quad (22)$$

de tal forma que se aseguran cambios suaves, niveles bajos, y el correcto funcionamiento de los modos de carga y apoyo en este ESS.

Tabla 1. Parámetros y ganancias del sistema en lazo cerrado.

Parámetro	Valor	Ganancia	Valor
$L_{FC,BT,SC}$	135 μ H	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	1000
C_{FC}	11.2 mF	α_4	0.15
C_O	1.88 mF	α_5	12450
C_{SC}	12.5 F	β	3.75
R_{int}	0.2 Ω	σ	0.01
K	0.3	a	2.219
R_L	5-10 Ω	b	0.5848
v_{SC}^*	24 V	c	40.45
v_O^*	48 V		

La dinámica de las corrientes, voltajes, señales de control, y estimación ante cambios de carga se muestran en las Figs. 5, 6, y 7.

Al reducir la carga R_L , el sistema de control regula v_O incrementando el nivel de i_O . La demanda instantánea de corriente se suministra con el supercapacitor (ESS modo de apoyo); después disminuye hasta llegar a su equilibrio; al mismo tiempo, se incrementa i_{LFC} hasta cumplir la demanda. Por diseño este cambio es suave; además, se diseña i_{LFC} con comportamiento subamortiguado, por lo que cuando hay exceso de corriente; se almacena en el supercapacitor (ESS modo de carga). La operación del sistema de control es similar cuando aumenta la carga R_L , invirtiendo los modos de operación del supercapacitor. Con respecto al ESS de la batería, se diseña para operar en los modos de apoyo y carga, de tal forma que se corrobora el funcionamiento del sistema de control. Cuando la ley de adaptación funciona ($t < 100$ s); se regula los voltajes v_O y v_{SC} ; hay un correcto seguimiento de trayectorias en corrientes, y se estima R_L correctamente. Cuando la ley de adaptación deja de aplicarse ($t > 100$ s), se observa un error al regular los voltajes v_O y v_{SC} . Para finalizar, un estudio detallado sobre el efecto en la pendiente de i_{LFC} sobre el estado de salud de la PEMFC, no es el enfoque de la investigación.

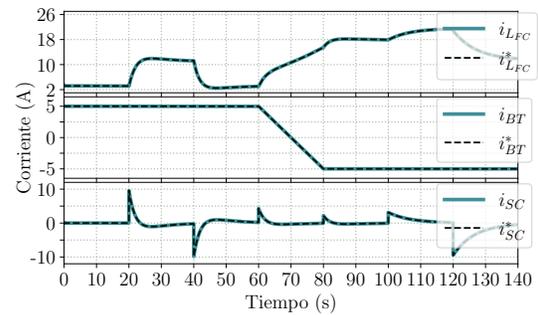


Fig. 5. Dinámica de las corrientes y sus referencias.

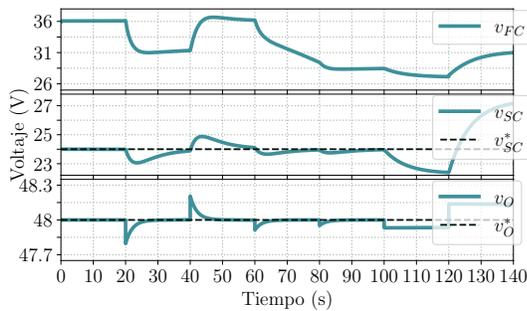


Fig. 6. Dinámica de los voltajes y sus referencias.

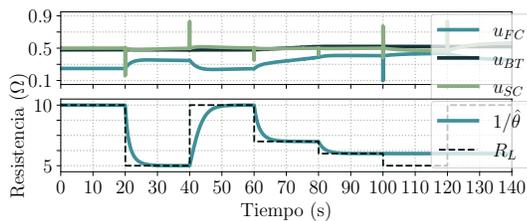


Fig. 7. Señales de control y estimación de la carga.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se presenta una solución al problema de control de la operación de un sistema de generación de energía (EGS) basado en celda de combustible y un sistema de almacenamiento de energía (ESS) híbrido basado en un supercapacitor y un banco de baterías. Esta solución hace uso de la separación dinámica entre las corrientes y los voltajes en el sistema, y en consecuencia se diseñan dos lazos de control: el lazo interno de corriente y el lazo externo de voltaje. Ambos lazos de control inyectan amortiguamiento y linealizan la dinámica de los errores de control. Por otro lado, no es necesario conocer el equilibrio de voltaje de la celda de combustible para el esquema propuesto, ya que a través de un análisis de estabilidad se demuestra que el voltaje de la celda tiende naturalmente a su equilibrio cuando las demás variables de error tienden a cero. Así también, para robustificar el lazo externo, se implementa un estimador basado en I&I para aproximar la resistencia de carga del sistema. Consecuentemente, se identifica una relación directa entre la referencia de corriente de la celda de combustible y la estimación de la carga, por lo que se asigna una convergencia lenta de la estimación para generar una referencia de corriente con una razón de cambio lenta, lo cual extiende la vida útil de la celda de combustible. En base a resultados numéricos, se obtuvo con éxito una regulación precisa de las variables de interés, así como un comportamiento robusto bajo cambios de carga y variaciones de voltaje de la celda. Como trabajo a futuro se plantea la implementación del sistema; demostrar estabilidad de ambos lazos de control con su ley de adaptación, y realizar una comparación entre distintos controladores.

REFERENCIAS

- Astolfi, A., Karagiannis, D., and Ortega, R. (2007). *Non-linear and Adaptive Control with Applications*. Springer Science & Business Media.
- Baset, D.A.E., Rezk, H., and Hamada, M. (2020). Fuzzy Logic Control Based Energy Management Strategy for Renewable Energy System. *Proc. 2nd 2020 Int. Youth Conf. Radio Electron. Electr. Power Eng. REEPE 2020*, 3(2), 6–10. doi:10.1109/REEPE49198.2020.9059203.
- Das, V., Padmanaban, S., Venkitesamy, K., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., and Siano, P. (2017). Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(March 2016), 10–18. doi:10.1016/j.rser.2017.01.148.
- Dicks, A.L. and Rand, D.A.J. (2018). *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons.
- Faraji, R. and Farzanehfard, H. (2020). Fully Soft Switched Multi-Port DC-DC Converter with High Integration. *IEEE Trans. Power Electron.*, 36(2). doi:10.1109/TPEL.2020.3010412.
- Khalil, H.K. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 3 edition.
- Kong, S., Hilaret, M., and Roche, R. (2019). Passivity-Based Control for a PV / Battery / Fuel Cell / Electrolyser Hybrid Power System. *2019 IEEE Milan PowerTech*, 0(2), 1–6. doi:10.1109/ptc.2019.8810688.
- Ogungbemi, E., Ijaodola, O., Khatib, F.N., Wilberforce, T., El Hassan, Z., Thompson, J., Ramadan, M., and Olabi, A.G. (2019). Fuel cell membranes – Pros and cons. *Energy*, 172, 155–172. doi:10.1016/j.energy.2019.01.034.
- Rezk, H., Nassef, A.M., Abdelkareem, M.A., Alami, A.H., and Fathy, A. (2021). Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system. *Int. J. Hydrogen Energy*, 46(8), 6110–6126. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.11.195.
- Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., and Chen, Z. (2020a). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131(July), 110015. doi:10.1016/j.rser.2020.110015.
- Wang, Y., Seo, B., Wang, B., Zamel, N., Jiao, K., and Cordobes, X. (2020b). Fundamentals, materials, and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology. *Energy AI*, 1(8), 100014. doi:10.1016/j.egyai.2020.100014.
- Zúñiga-Ventura, Y.A., Leyva-Ramos, J., Díaz-Saldierna, L.H., Díaz-Díaz, I.A., and Langarica-Córdoba, D. (2018). Nonlinear Voltage Regulation Strategy for a Fuel Cell / Supercapacitor Power Source System. *IECON 2018 - 44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.* doi:10.1109/iecon.2018.8591410.