

Jornadas de Automática

Modelo No Lineal del Conjunto Batería Convertidor para Microrredes

Feijóo. R., Juan^{a,*}, Rubio, Francisco R.^a

^aDpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Camino Descubrimientos, 41092, Sevilla, España.

To cite this article: Feijóo.R, J, Rubio, F.R. 2025. Non linear model of battery converter for microgrids. Jornadas de Automática, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12240>

Resumen

En este artículo se muestra una propuesta de modelo no lineal discreto para el conjunto batería-convertidor presente en la mayoría de topologías de microrredes. La motivación principal es disponer de un modelo de alta resolución sobre el que realizar simulaciones o incorporarlo en el optimizador de un controlador predictivo avanzado. En el artículo se muestran las ecuaciones necesarias de las que deben disponer los modelos y se realizan algunas manipulaciones para que aparezcan las variables de control deseadas realizando ciertas definiciones. Además se trata en detalle la interacción mutua entre batería y convertidor y la obtención del espacio factible de trabajo dado un cierto estado del sistema. Finalmente se presenta un caso práctico de aplicación y se comentan los resultados.

Palabras clave: Microrredes, Modelado y simulación de sistemas de potencia, Electrónica de potencia, Análisis y diseño no lineal, Monitoreo de seguridad y restricciones y Control de sistemas

Non Linear Model of Battery and Converter for Microgrids

Abstract

This paper presents a novel nonlinear discrete-time model for the battery-converter assembly commonly found in the majority of microgrid topologies. The primary motivation is to develop a high-resolution model suitable for simulations or for integration into the optimizer of an advanced predictive controller. The necessary equations for such models are presented, and through algebraic manipulation and the introduction of specific definitions, the desired control variables are explicitly incorporated. Furthermore, the mutual interaction between the battery and the converter is addressed in detail, along with the determination of the feasible operating space given a particular system state. Finally, a practical application case study is presented, and the corresponding results are discussed.

Keywords: Smart grids, Modeling and simulation of power systems, Power electronics, Nonlinear analysis and design, Constraint and security monitoring and Control systems

1. Introducción

Una microrred es un sistema eléctrico local compuesto generalmente por cargas, fuentes de generación distribuida (como paneles solares, generadores eólicos, generadores de gas o diésel) y sistemas de almacenamiento que pueden operar conectados a la red principal o de forma aislada.

En los últimos años las microrredes han supuesto un foco de atención debido a su papel en el progresivo cambio de paradigma de la producción centralizada tradicional y el consumo

descentralizado (Hirsch et al., 2018) (Shahgholian, 2021).

El objetivo de este artículo es proporcionar un modelo discreto que tenga en cuenta las no linealidades de operación del conjunto batería-convertidor, así como sus restricciones agregadas. Resulta novedosa la consideración de las interacciones entre la batería y el convertidor en función del estado de carga y de las potencias a partir de sus modelos individuales, un enfoque no encontrado en la revisión de la literatura especializada

*Autor para correspondencia: juafeirod@alum.us.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Disponer de un buen modelo de microrred es vital para realizar simulaciones del sistema real: Análisis de sensibilidad, robustez, toma de decisiones para el diseño final, etc. Y además puede incorporarse en la estructura de controladores predictivos basados en modelo (MPC) para operarlas de manera óptima (Bordons et al., 2020).

La estructura de las ecuaciones del modelo buscada se presenta en [1], sujeto a restricciones de la forma [2].

$$\begin{cases} SOC_{k+1} = SOC_k + \eta_{carga,k}(SOC_k, P_k) \cdot \frac{P_k \cdot T_d}{C_{energia}} \\ SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{P_k \cdot T_d}{\eta_{descarga,k}(SOC_k, P_k) \cdot C_{energia}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_k \in [P_{k,max} = P_{k,max}(SOC_k), P_{k,min} = P_{k,min}(SOC_k)] \quad (2)$$

Se tendrán en cuenta las siguientes hipótesis simplificadas a lo largo del presente documento:

- No existe dependencia con la temperatura.
- La capacidad de la batería no fluctúa con el tiempo: No existe degradación ni se considera el efecto Peukert.
- El voltaje del bus DC no fluctúa, pues se considera regulado por lazos de control primarios.
- El convertidor solo se analiza desde un punto de vista estático, no se considera su dinámica.

2. Modelo de carga

El modelo de carga relaciona la potencia de entrada al sistema (P_c) con la variación del estado de carga (SOC) de la batería. La Figura 1 ilustra el esquema del modelo.

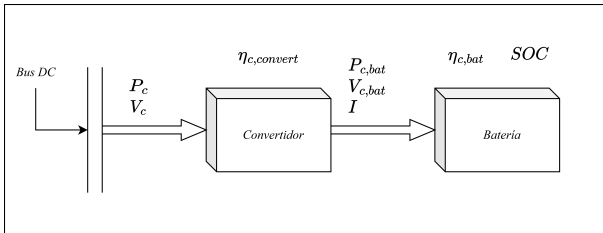


Figura 1: Esquema del modelo de carga.

Donde las variables empleadas se definen como:

$V_{c,bat}$	Voltaje de la batería en carga
I	Corriente de carga en la batería
$\eta_{c,bat}$	Eficiencia de carga de la batería
$P_{c,bat}$	Potencia de carga de la batería
$\eta_{c,conv}$	Eficiencia del convertidor en la carga
P_c	Potencia de entrada al sistema
SOC	Estado de carga
C_{10}	Capacidad nominal a 10 horas
$I_{10} = \frac{C_{10}}{10}$	Corriente de carga/descarga a 10 horas
$p_c = \frac{P_c}{P_{nom}}$	Potencia normalizada
$v_c = \frac{V_c}{V_{nom}}$	Voltaje normalizado

El modelo de carga estático reúne las interrelaciones entre variables de interés para cada instante t y viene dado por [3].

$$\begin{cases} V_{c,bat} = V_{c,bat}(SOC, I) \\ \eta_{c,bat} = \eta_{c,bat}(SOC, I) \\ P_{c,bat} = P_{c,bat}(V_{c,bat}, I) = V_{c,bat} \cdot I \\ \eta_{c,conv} = \eta_{c,conv}(P_c, V_c) \\ P_c = P_c(P_{c,bat}, \eta_{c,conv}) = \frac{P_{c,bat}}{\eta_{c,conv}} \end{cases} \quad (3)$$

La elección de estas dependencias específicas no es arbitraria, sino que viene impuesta por los modelos empleados. Puede observarse que el sistema posee 2 grados de libertad y quedaría determinado si se impusiesen las dos variables de interés P_c (entrada) y SOC (estado).

Resulta conveniente introducir dos definiciones de nuevas variables que fundamentalmente permiten separar la capacidad [4] de las no linealidades adimensionales [5].

$$C_{energia} \triangleq C_{carga} \cdot V_{ref} \quad (4)$$

$$\eta_c(SOC, P_c) \triangleq \frac{V_{ref} \cdot I(SOC, P_c) \cdot \eta_{c,bat}(SOC, P_c)}{P_c} \quad (5)$$

Una vez resuelta la determinación de todas las variables del sistema instantáneamente, se estudia la dinámica del sistema que viene dada por la ecuación del contador de Coulomb [6].

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{I(SOC(t), P_c(t)) \cdot \eta_{c,bat}(SOC(t), P_c(t))}{C_{carga}} \quad (6)$$

Si se incorporan en la expresión [6], las definiciones [4], [5] se obtiene la formulación final de ecuación diferencial no lineal de la dinámica del sistema en la carga [7].

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{\eta_c(SOC(t), P_c(t))}{C_{energia}} \cdot P_c(t) \quad (7)$$

Discretizando la ecuación [7] con el método de Euler con un periodo de muestreo T_m en el que se supone un ZOH (Zero Order Holder) para P_c (entrada del sistema) se obtiene [8] que posee la estructura buscada originalmente.

$$SOC_{k+1} = SOC_k + \frac{\eta_{c,k}(SOC_k, P_{c,k}) \cdot P_{c,k} \cdot T_m}{C_{energia}} \quad (8)$$

3. Modelo de descarga

El modelo de descarga relaciona la potencia de salida del sistema (P_d) con la variación del estado de carga (SOC) de la batería. La Figura 2 ilustra el esquema del modelo.

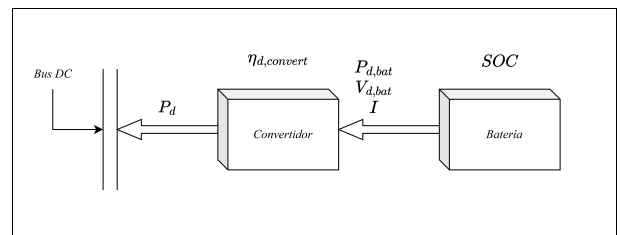


Figura 2: Esquema del modelo de descarga.

Donde las variables nuevas empleadas tienen las siguientes definiciones:

$V_{d,bat}$	Voltaje de la batería en descarga
I	Corriente de descarga
$P_{d,bat}$	Potencia de descarga de la batería
$\eta_{d,convert}$	Eficiencia del convertidor en la descarga
P_d	Potencia de salida del sistema
p_d	Potencia normalizada: $\frac{P_{d,bat}}{P_{nom}}$
v_d	Voltaje normalizado: $\frac{V_{d,bat}}{V_{nom}}$

El modelo de descarga estático reúne las interrelaciones entre variables de interés para cada instante t y viene dado por [9]. Nótese que al haberse asignado todas las ineficiencias internas de la batería al proceso de carga se tiene una ecuación menos, pero el sistema sigue quedando determinado si se conocen P_d (entrada) y SOC (estado).

$$\begin{cases} V_{d,bat} = V_{d,bat}(SOC, I) \\ P_{d,bat} = P_{d,bat}(V_{d,bat}, I) = V_{d,bat} \cdot I \\ \eta_{d,convert} = \eta_{d,convert}(P_{d,bat}, V_{d,bat}) \\ P_d = P_d(P_{d,bat}, \eta_{d,convert}) = P_{d,bat} \cdot \eta_{d,convert} \end{cases} \quad (9)$$

Nuevamente resulta conveniente introducir dos definiciones de variables que fundamentalmente permiten separar la capacidad [10] de las no linealidades adimensionales [11].

$$C_{energia} \triangleq C_{carga} \cdot V_{ref} \quad (10)$$

$$\eta_d(SOC, P_d) \triangleq \frac{P_d}{V_{ref} \cdot I(SOC, P_d)} \quad (11)$$

Una vez resuelto el valor de todas las variables instantáneamente, se introduce la ecuación dinámica del sistema dada por el contador de Coulomb para la descarga [12].

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = -\frac{1}{C_{carga}} \cdot I(SOC(t), P_d(t)) \quad (12)$$

Incorporando en [12], las definiciones [10], [11] se obtiene la formulación final de ecuación diferencial no lineal de la dinámica del sistema en la descarga [13].

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = -\frac{P_d(t)}{C_{energia} \cdot \eta_d(SOC(t), P_d(t))} \quad (13)$$

Discretizando la ecuación [13] con el método de Euler con un periodo de muestreo T_m en el que se supone un ZOH (Zero Order Holder) para P_d (entrada del sistema) se obtiene [14] que posee la estructura buscada originalmente.

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{P_{d,k} \cdot T_m}{\eta_{d,k}(SOC_k, P_{d,k}) \cdot C_{energia}} \quad (14)$$

4. Propuestas para V_{ref}

El voltaje de referencia supone un valor equivalente constante de carga/descarga de la batería que permite calcular la

capacidad de la misma en términos de energía dada la capacidad en carga facilitada típicamente por las hojas de los fabricantes. Adicionalmente, la introducción de este valor, permite desagrupar los términos de capacidad y eficiencia global permitiendo la formulación no lineal dada por [1].

Desde el punto de vista matemático, cualquier valor $V_{ref} \neq 0$ resulta válido, pero si además cumple los requisitos: $V_{ref} > 0$, $\eta_c < 1$ y $\eta_d < 1$, se dota de interpretación a los términos del modelo propuesto, en particular a las variables η_c , η_d y $C_{energia}$. Estas condiciones se condensan en [15]

$$\begin{cases} V_{ref} \in \left(0, \min\left(\frac{P_c}{I(P_c, SOC) \cdot \eta_{c,bat}(P_c, SOC)}, \frac{P_d}{I(P_d, SOC)}\right)\right) \\ \forall P_c \in \mathcal{P}_c \quad \forall P_d \in \mathcal{P}_d \quad \forall SOC \in SOC \end{cases} \quad (15)$$

Se muestran a continuación algunas propuestas para definir V_{ref} que deben cumplir estas condiciones:

$$V_{c,bat}(SOC = 0,5, I = 0) \quad (16)$$

$$\gamma_1 V_{c,bat}(SOC = 0,5, I = 0) + \gamma_2 V_{d,bat}(SOC = 0,5, I = 0) \quad (17)$$

$$\gamma_1 V_{c,bat}(SOC_{medio}, I_{medio}) + \gamma_2 V_{d,bat}(SOC_{medio}, I_{medio}) \quad (18)$$

$$\int_{soc=SOC_{min}}^{soc=SOC_{max}} \int_{i=I_{min}}^{i=I_{max}} P(SOC = soc, I = i) \cdot [\gamma_1 V_{c,bat}(soc, i) + \gamma_2 V_{d,bat}(soc, i)] dsoc di \quad (19)$$

Teniendo en cuenta las restricciones [20]. Donde $P(SOC = soc, I = i)$ representa la probabilidad de que el conjunto se halle en un determinado punto de trabajo.

$$\begin{cases} \gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 \\ \int_{soc=SOC_{min}}^{soc=SOC_{max}} \int_{i=I_{min}}^{i=I_{max}} P(soc, i) dsoc di = 1 \end{cases} \quad (20)$$

Las dos primeras propuestas [16 y [17] promueven sencillez al no requerir información del funcionamiento final del sistema por lo que van dirigidas a la implementación de un simulador. La definición [16] será la empleada en el caso práctico de aplicación que se muestra a continuación.

Las dos últimas propuestas [19 y 20] son complejas pues requieren un alto grado de conocimiento de las condiciones de funcionamiento del sistema, por lo que pueden ser interesantes para la creación de un gemelo digital de un sistema que se encuentre ya en operación.

5. Caso práctico de aplicación

En este apartado se muestra un caso práctico de aplicación en el que se emplean modelos individuales identificados separadamente de un convertidor y de una batería, con tal de obtener un modelo discreto no lineal del comportamiento del conjunto batería-convertidor.

5.1. Ecuaciones de la batería

Las ecuaciones para el modelado de una batería pueden provenir de equivalentes en circuito eléctrico (Ceraolo, 2000), modelos químicos (Manwell and McGowan, 1993), modelos empíricos (Franke and Kowal, 2018) o modelos electroquímicos (Copetti et al., 1993). En este artículo se ha escogido el último enfoque basándose en (Copetti et al., 1993), el cual ha sido validado con éxito en (Vivas et al., 2020) (Achaibou et al., 2012) para baterías de diferente capacidad.

El modelo para $V_{c,bat} = V_{c,bat}(SOC, I)$ de una batería de plomo-ácido de n_{celdas} celdas para carga (2V) de Copetti viene dada por [21].

$$V_{c,bat} = V_{c,bat}(SOC, I) = n_{celdas} \cdot [(2 + 0,16SOC) + \frac{I}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - SOC)^{1,2}} + 0,036 \right)] \quad (21)$$

Las ineficiencias internas en el ciclo carga/descarga $\eta_{c,bat} = \eta_{c,bat}(SOC, I)$ de una batería plomo-ácido se ajustan por Copetti por la expresión [22].

$$\eta_{c,bat} = 1 - \exp \left(\frac{a}{\frac{I}{I_{10}} + b} (SOC - 1) \right) \quad (22)$$

El modelo para $V_{d,bat} = V_{d,bat}(SOC, I)$ de una batería de plomo-ácido de n_{celdas} celdas para descarga (2V) de Copetti viene dada por [23].

$$V_{d,bat} = V_{d,bat}(SOC, I) = n_{celdas} \cdot [(2,085 - 0,12 \cdot (1 - SOC)) - \frac{I}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I^{1,3}} + \frac{0,27}{SOC^{1,5}} + 0,02 \right)] \quad (23)$$

5.2. Modelo del convertidor

Existen muchos modelos para los convertidores, pero puesto que no se considerará su dinámica, se pretende buscar una función analítica del rendimiento estático en función de variables como la potencia y el voltaje y parámetros internos a identificar.

El artículo (Dupont et al., 2011), reúne diferentes propuestas analíticas $\eta_{c,conv} = \eta_{c,conv}(P_c, V_c)$ y $\eta_{d,conv} = \eta_{d,conv}(P_d, V_d)$ para el rendimiento de un convertidor genérico (Rampinelli, 2010), (Driesse et al., 2008), (Jantsch et al., 1992), (Chivelet et al., 1994).

De todos ellos, la propuesta dada por (Driesse et al., 2008) muestra un buen compromiso entre complejidad y capacidad de caracterización y será el que se emplee.

Las funciones parametrizables tienen la misma forma para la carga 24 y para la descarga 25.

$$\eta_{c,conv}(p_c, v_c) = \frac{p_c}{p_c + k_0''(v_c) + k_1''(v_c) \cdot p_c + k_2''(v_c) \cdot p_c^2} \quad (24)$$

$$\eta_{d,conv}(p_d, v_d) = \frac{p_d}{p_d + k_0''(v_d) + k_1''(v_d) \cdot p_d + k_2''(v_d) \cdot p_d^2} \quad (25)$$

Donde los coeficientes dependientes del voltaje normalizado son $i = c, d$ y vienen dados por 26.

$$\begin{cases} k_0''(v_i) = k_{0,0,i} + k_{0,1,i}v_i + k_{0,2,i}v_i^2 \\ k_1''(v_i) = k_{1,0,i} + k_{1,1,i}v_i + k_{1,2,i}v_i^2 \\ k_2''(v_i) = k_{2,0,i} + k_{2,1,i}v_i + k_{2,2,i}v_i^2 \end{cases} \quad (26)$$

5.3. Parámetros concretos para una batería y un convertidor

En este apartado se presentan los valores concretos de los parámetros para las funciones identificadas de una batería y un convertidor que podrían trabajar conjuntamente en un montaje de una microrred.

La batería escogida es, naturalmente, de plomo-ácido, con una capacidad nominal en términos de carga de 100 Ah para un ciclo de descarga de 10 horas, es decir $C_{10} = 100$ Ah y $n_{celdas} = 6$, lo que hace que reciba la denominación de “batería de 12V” en cualquier hoja de características de un catálogo. Podría tomarse como valor $V_{ref} = 12$ V pero se ha preferido emplear [16] que arroja $V_{ref} = 12,48$ V. Mediante las definiciones anteriores se calculan los valores de [27].

$$\begin{cases} C_{energia} = 1248Wh & \text{Capacidad de la batería} \\ P_{ref} = 124,8W & \text{Potencia descarga en 10h} \end{cases} \quad (27)$$

Donde se han obtenido los parámetros restantes del modelo de la batería para la función de las ineficiencias internas del ciclo carga/descarga del artículo (Copetti et al., 1993) que ofrece los valores dados por [28] para los ensayos con baterías de capacidades similares a la escogida.

$$\begin{cases} a = 20,73 & \text{Escala de la curva exponencial} \\ b = 0,55 & \text{Offset de la intensidad adimensional} \end{cases} \quad (28)$$

Para el convertidor se han tomado los datos de identificación concretos de un modelo de convertidor de elevación DC de 250 W con una frecuencia de conmutación de 10 KHz tomados el artículo (Dupont et al., 2011). Los parámetros de las curvas de eficiencia estática están recogidos en la tabla siguiente:

Tabla 1: Parámetros del convertidor

Parámetro	Valor
$b_{0,0}$	13.2619×10^{-3}
$b_{0,1}$	3.7718×10^{-3}
$b_{0,2}$	40.0147×10^{-3}
$b_{1,0}$	124.3920×10^{-3}
$b_{1,1}$	-428.5556×10^{-3}
$b_{1,2}$	-351.3761×10^{-3}
$b_{2,0}$	-85.3099×10^{-3}
$b_{2,1}$	343.4734×10^{-3}
$b_{2,2}$	292.4794×10^{-3}
P_{nom}	$\sim 2 \cdot P_{ref} \approx 250$ W
v_c	1
v_d	$\frac{V_{d,bat}}{1,1 \cdot V_{ref}}$

Donde se ha considerado que los convertidores que controlan el flujo de potencia en la carga y en la descarga tienen comportamientos idénticos.

Adicionalmente se han impuesto restricciones que deben cumplirse en todo instante entre las transiciones de un estado k al siguiente $k + 1$ y que se verifican en el proceso de integración de las ecuaciones diferenciales no lineales. Para el modelo de carga se ha impuesto $V_{bat} < 20$ V e $I < 15$ A. Para el modelo de descarga se ha impuesto $V_{bat} > 11$ V e $I < 30$ A.

Las simulaciones se han llevado a cabo en el rango de potencias $P_c, P_d \in [0, 250]$ W y en el rango de estados de carga $SOC \in [0, 15, 0,95]$ para la descarga y $SOC \in [0, 0,95]$ para la carga.

5.4. Rendimientos no lineales y regiones factibles

Con los datos concretos de la batería y del convertidor se muestran los resultados obtenidos. La figura [3] resulta de obtener la función 5.

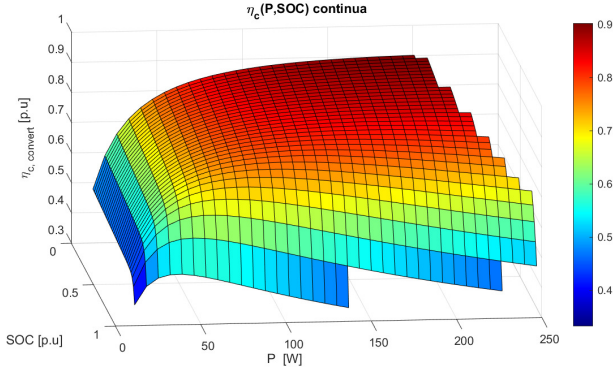


Figura 3: Función del rendimiento instantáneo global para la carga.

Realizando el proceso de integración se obtiene $\eta_{c,k}(SOC_k, P_{c,k})$ de 8 que viene dada por la figura [4], y por la figura 5 que representa el espacio factible de trabajo.

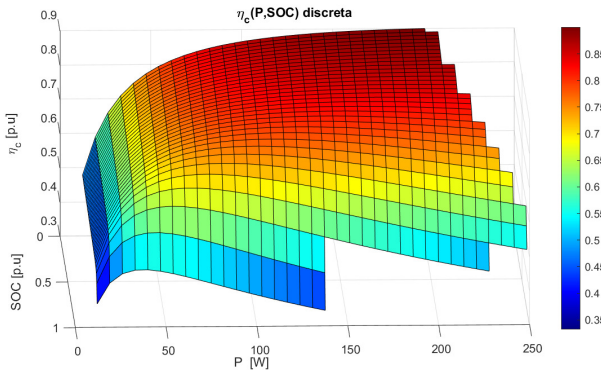


Figura 4: Función del rendimiento discreto global para la carga.

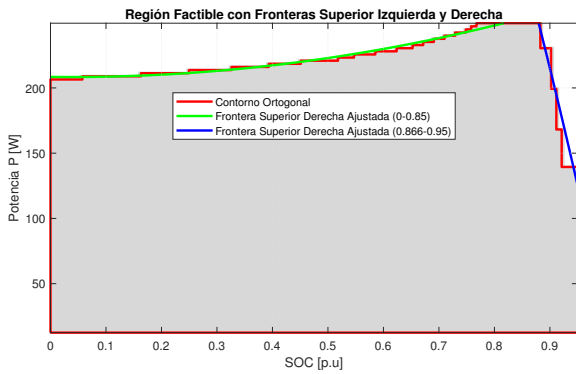


Figura 5: Zona factible operación en el modelo de carga para el conjunto.

La figura [6] resulta de obtener la función 11.

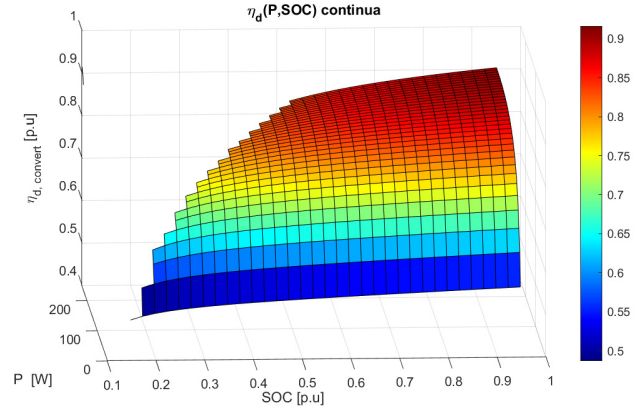


Figura 6: Función del rendimiento instantáneo global para la descarga.

Realizando el proceso de integración se obtiene $\eta_{d,k}(SOC_k, P_{d,k})$ de 15 que viene dada por la figura [7], y por la figura 8 que representa el espacio factible de trabajo.

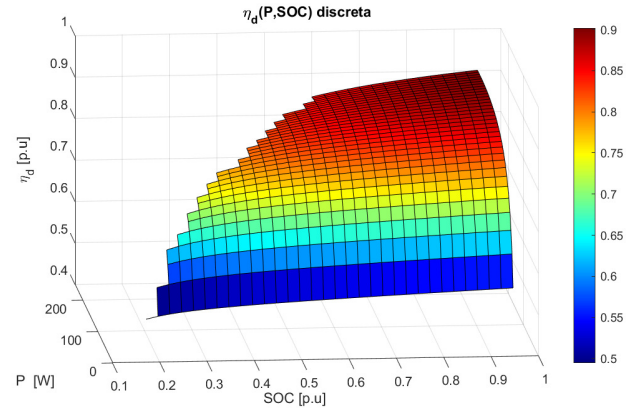


Figura 7: Función del rendimiento discreto global para la descarga.

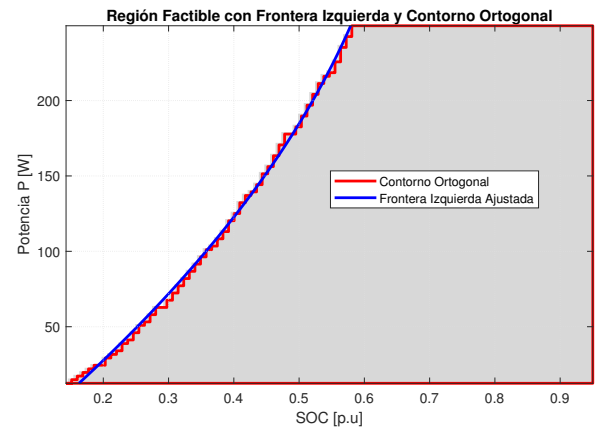


Figura 8: Zona factible operación en el modelo de descarga para el conjunto.

5.5. Comparación de modelos

En la figura 9 se compara el modelo obtenido (modelo 3), con otros modelos menos complejos empleados en la literatura científica (Bordons et al., 2020) (modelos 1,2) en una simulación en bucle abierto de un ciclo de carga y descarga, pues son este tipo de simulaciones en bucle abierto las que realizan

los algoritmos de optimización de un MPC. Tal como se puede apreciar por la figura 9, el modelo 1 (rendimientos ideales) comete desviaciones apreciables.

El modelo 2 no comete desviaciones tan significativas pues se ha ajustado su rendimiento constante no unitario con el rendimiento no constante del modelo 3. Aunque las desviaciones observadas sean nimias estas se acumulan en horizontes más largos (es habitual trabajar con ventanas de predicción de 24 h en los MPC secundarios de control de una microrred) e impiden trabajar en las regiones próximas a las restricciones por tener que dejar un mayor margen.

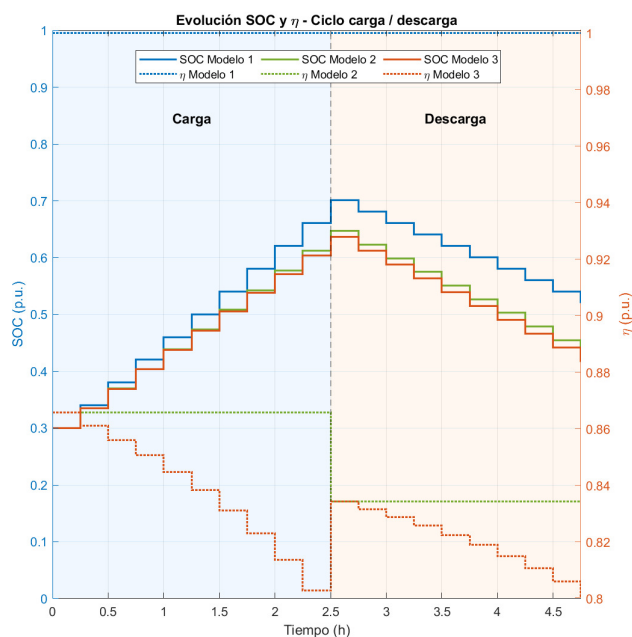


Figura 9: Evolución del SOC en tres modelos de creciente complejidad. Para un experimento de carga a $P_c = 200$ W durante $\Delta t = 2,5$ h y de descarga a $P_d = 100$ W durante $\Delta t = 2,5$ h.

6. Conclusiones

En este artículo se ha mostrado el procedimiento para la obtención de un modelo del conjunto batería-convertidor cuando se tienen en cuenta las relaciones mutuas que existen entre ambos.

Se han propuesto definiciones de variables auxiliares que permiten la conversión de datos de los fabricantes a parámetros típicamente empleados en formulaciones de control. Estas variables auxiliares, ayudan también a adimensionalizar las no linealidades del conjunto y ofrecen una interpretación sencilla e intuitiva de su comportamiento en términos de eficiencia global del sistema batería-convertidor.

Además se ha mostrado que la incorporación de restricciones lineales en diferentes variables del modelo arroja espacios factibles no lineales. La identificación de estas fronteras del espacio factible de operación conduce de manera natural a su incorporación en el bloque de optimización de algoritmos de control avanzados.

Finalmente se ha implementado una simulación del modelo del conjunto partiendo de la base de identificaciones individuales del convertidor y de la batería dadas por dos artículos fuente para unos componentes concretos.

Como trabajo futuro sería interesante validar de manera experimental el modelo de un conjunto completo batería-convertidor. Otra línea de trabajo que de forma natural se presenta es la formulación de controladores predictivos avanzados que incorporen este modelo no lineal para la gestión óptima de microrredes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de una Beca de Investigación en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla. Así mismo, ha recibido el apoyo de la Unidad de Excelencia EN-GREEN de la Universidad de Sevilla. Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por los proyectos PID2020-115561RBC32 y PID2023-148456OB-C43, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- Achaibou, N., Haddadi, M., Malek, A., 2012. Modeling of lead acid batteries in pv systems. *Energy Procedia* 18, 538–544.
- Bordons, C., Garcia-Torres, F., Ridao, M. A., 2020. Model Predictive Control of Microgrids. *Advances in Industrial Control*. Springer.
- Ceraolo, M., 2000. New dynamical models of lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Power Systems* 15.
- Chivelet, N. M., Chenlo-Romero, F., Alonso-Garcia, M. C., 1994. Modelado y fiabilidad de los inversores para instalaciones fotovoltaicas autónomas a partir de medidas con cargas resistivas y reactivas. 7th Congreso Ibérico de Energía Solar, 463–468.
- Copetti, J. B., Lorenzo, E., Chenlo, F., 1993. A general battery model for pv system simulation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 1, 283–292.
- Driesse, A., Jain, P., Harrison, S., 2008. Beyond the curves: modeling the electrical efficiency of photovoltaic inverters. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC '08), 1–6.
- Dupont, F. H., Bertomeu, J. Z., Rech, C., Pinheiro, J. R., 2011. Mathematical efficiency modeling of static power converters.
- Franke, M., Kowal, J., 2018. Empirical sulfation model for valve-regulated lead-acid batteries under cycling operation. *Journal of Power Sources* 380, 76–82.
- Hirsch, A., Parag, Y., Guerrero, J., 2018. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, 402–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>
- Jantsch, M., Schmidt, H., Schmid, J., 1992. Results of the concerted action on power conditioning and control. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1589–1593.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., 1993. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy* 50, 399–405.
- Rampinelli, G. A., 2010. Estudio de características eléctricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a red.
- Shahgholian, G., 2021. A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control. DOI: 10.1002/2050-7038.12885
- Vivas, F., Segura, F., Andújar, J., Caparrós, J., 2020. A suitable state-space model for renewable source-based microgrids with hydrogen as backup for the design of energy management systems. *Energy Conversion and Management* 219, 113053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113053>