

Jornadas de Automática

Control óptimo multicapa de redes inteligentes

Hosseindokht, S.M.^a, Blesa, J.^{a,b*}, Puig, V.^{a,b}

^a Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, Llorens i Artigues 4-6, 08028 Barcelona, España

^b Dpto. d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial, Campus Diagonal Sud, Edifici H. Av. Diagonal, 647 08028 Barcelona España.

To cite this article: Hosseindokht, S.M., Blesa, J., Puig, V. 2024. Multilayer optimal control of smart grids. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10858>

Resumen

Las redes eléctricas inteligentes y las microrredes representan una evolución significativa respecto a las redes tradicionales, integrando tecnologías avanzadas para optimizar la gestión y distribución de energía. La creciente complejidad de estas redes requiere enfoques de control sofisticados que gestionen múltiples objetivos y restricciones. El control multicapa surge como una solución eficaz, proporcionando una estructura jerárquica que mejora la eficiencia operativa y la capacidad de integrar fuentes de energía renovable y tecnologías de almacenamiento. En este trabajo se propone una estrategia de control de redes eléctricas inteligentes que contempla dos capas de control: nivel de microrred y nivel de componentes. Para el control a nivel de microrred se considera un control económico predictivo que proporciona las potencias de trabajo de los diferentes componentes y que mediante un control local se consiguen alcanzar. Se utiliza un caso de estudio basado en una microrred real de laboratorio para mostrar la eficiencia del método propuesto.

Palabras clave: Control predictivo de modelos y basado en optimización, Redes energéticas inteligentes, Control jerárquico multinivel y multicapa, Control robusto.

Multilayer optimal control of smart grids

Abstract

Smart grids represent a significant evolution compared to traditional grids, integrating advanced technologies to optimize energy management and distribution. The increasing complexity of these networks requires sophisticated control approaches to manage multiple objectives and constraints. Multilayer control emerges as an effective solution, providing a hierarchical structure that enhances operational efficiency and the capacity to integrate renewable energy sources and storage technologies. This paper proposes a smart grid control strategy that includes two control layers: the microgrid level and the component level. For network-level control, an economic predictive control is considered, which provides the working powers of the different components, and local control allows regulation. A case study based on a real smart grids is used to demonstrate the efficiency of the proposed method.

Keywords: Predictive control, Smart energy grids, Hierarchical multilevel and multilayer control, Robust control.

1. Introducción

En la literatura, para la gestión de redes inteligentes complejas se ha propuesto un enfoque jerárquico de múltiples capas (Bordons *et al.*, 2020). En la capa inferior, se utilizan esquemas de control y supervisión a nivel de componentes integrando no sólo los dispositivos eléctricos sino también los sistemas de almacenamiento. En la capa intermedia, la gestión y el almacenamiento óptimos de energía de las

microrredes se utilizan enfoques de modelado basado en el flujo de energía que permiten aplicar sistemas de control avanzado capaces de abordar no sólo los índices de desempeño económico sino también tener en cuenta la salud de los componentes del sistema con el objetivo de maximizar su vida útil. Finalmente, en la capa superior, se considera el problema de coordinar varias redes para maximizar el rendimiento global mediante el uso de algoritmos avanzados

de coordinación basados, entre otros, en la teoría de juegos o algoritmos de negociación.

En la capa intermedia, diferentes trabajos recientes han propuesto utilizar el enfoque de Control Predictivo Económico (EMPC, por sus siglas en inglés) para automatizar la gestión óptima y el control de las redes eléctricas inteligentes (Nassourou, *et al.*, 2020a), ya que este tipo de controladores permite considerar restricciones en los diferentes componentes de la microrred y los precios de la energía para obtener una solución óptima y adecuada. En Ju *et al.* (2024), se presenta una revisión reciente del estado del arte sobre EMPC aplicado a microrredes. De esta revisión se desprende que si bien existen muchos trabajos que han propuesto el uso de EMPC en la capa intermedia su integración con la capa inferior teniendo en cuenta los diferentes periodos de muestreo aún no se ha investigado demasiado. Dado el desarrollo continuo y la aplicación de diversos métodos de EMPC, existe una necesidad apremiante de una visión general comprensiva para comprender mejor los diferentes enfoques. Existen varias revisiones que examinan y comparan diferentes métodos de control para microrredes. Por ejemplo, en Hu, *et al.* (2022), se da una visión general del control de convertidores de potencia en paralelo en aplicaciones de microrredes. Sin embargo, esta revisión aborda principalmente el control de convertidores de potencia a nivel de dispositivo, omitiendo el control y la optimización de energía a nivel de sistema. En contraste, Mohammed *et al.* (2019) ofrece una breve visión general de las técnicas de control a nivel de sistema destinadas a lograr operaciones óptimas en microrredes.

Por otro lado, existen resultados preliminares de esquemas multicapa en la literatura para integrar los diferentes niveles de control de redes eléctricas que pueden considerarse como punto de partida para este trabajo (en Abhishek *et al.* (2020), se presenta una revisión reciente). En particular, Zhou *et al.* (2023) plantea un control jerárquico entre las capas intermedia e inferior basada en un control MPC que mejora el rendimiento del sistema de conversión de energía renovable. Norambuena *et al.* (2023) propone un control MPC jerárquico en un sistema compuesto por convertidores de dos niveles alimentados por tensión continua con alimentación de cargas y conexión a red.

En este trabajo se propone una estrategia de control de redes eléctricas inteligentes que contempla dos capas de control: nivel de microrred y nivel de componentes. Para el control a nivel de microrred se considera un control EMPC que proporciona las potencias de trabajo de los diferentes componentes y que mediante un control local se consiguen alcanzar. Para ilustrar el método propuesto se utiliza un caso de estudio basado en una microrred real de laboratorio.

La estructura del resto del artículo es la siguiente: La Sección 2 presenta el esquema de control multicapa propuesto. La Sección 3 presenta el caso de estudio. La Sección 4 presenta los resultados en simulación y discusión de resultados. La Sección 5 presenta las conclusiones.

2. Esquema de control propuesto

En este trabajo se propone una estrategia de control de redes eléctricas inteligentes que contempla dos capas de control: nivel de microrred y nivel de componentes (ver Figura 1). El nivel de microrred (nivel superior) es responsable de la operación económica y fiable de la microrred. Este nivel se encarga de la optimización y gestión de la energía considerando el coste energético para determinar las referencias de las potencias eléctricas de los diferentes componentes de la microrred. Con este propósito se utilizará un controlador EMPC. Posteriormente, los controladores a nivel de componentes (nivel inferior) serán responsables de seguir las referencias de potencia para los diferentes componentes físicos. El controlador EMPC determinará la potencia eléctrica que debe producir una pila de combustible, y el nivel inferior controlará el compresor, en particular la cantidad de flujo másico y presión del aire hacia una pila de combustible.

El control de componentes, como el compresor, requerirá técnicas avanzadas de control para abordar las no linealidades de los componentes, así como sus dinámicas complejas. Un punto crítico en el control multicapa será la integración de los controladores de nivel superior e inferior. Los controladores de la capa superior EMPC trabajarán en tiempo discreto considerando tiempos de muestreo donde los precios de la energía son constantes (por ejemplo, cada hora). Sin embargo, los controladores de nivel inferior deberán garantizar la estabilidad y el rendimiento de los componentes en tiempo continuo o tiempos de discretización mucho más bajos.

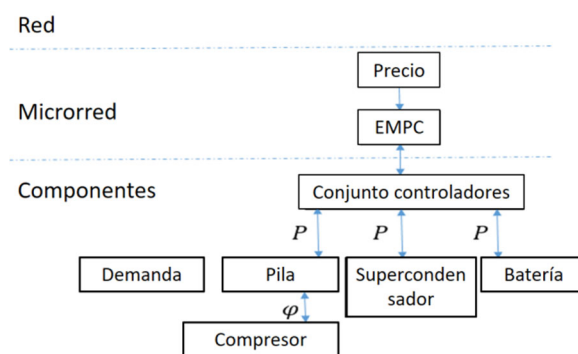


Figura 1: Esquema de control multicapa.

3. Caso de estudio

El caso de estudio de este artículo se basa en una red inteligente real ubicada en el Instituto de Robótica e Informática Industrial (IRI) de Barcelona. En la Figura 2, se describe la conexión de los diferentes elementos que conforman la red inteligente mediante un bus de corriente continua (DC bus). En este trabajo se ha utilizado un modelo de la microrred implementado en el software MATLAB/Simulink para el apartado de resultados (simulaciones).

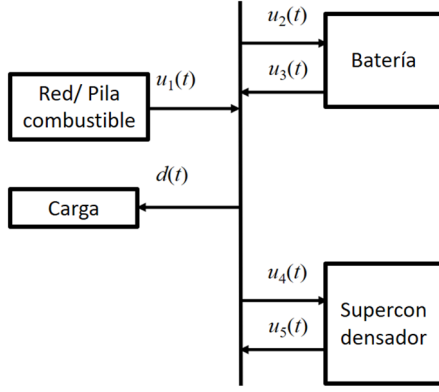


Figura 2: Esquema de la red inteligente del caso de estudio.

Tal como se puede observar en la Figura 2, un bus de corriente continua conecta los diversos componentes de la red inteligente: generador (fuente de alimentación conectada a la red/pila de combustible), batería, supercondensador y carga. Las señales de control ($u_i(t) \ i=1, \dots, 5$) son: la potencia eléctrica que genera la pila de combustible/red ($u_1(t)$), la potencia de carga o descarga de la batería ($u_2(t)$ y $u_3(t)$ respectivamente), la potencia de carga y descarga del supercondensador ($u_4(t)$ y $u_5(t)$ respectivamente).

La fuente de energía de esta red proviene de la red eléctrica exterior o de una pila de combustible (en este caso fuente de alimentación) controlada por la señal de control $u_1(t)$, ya que se puede realizar un control preciso de esta y también porque se considera el precio de la red eléctrica. Además, permite conectar una carga eléctrica que recibirá la energía de esta fuente o de unos elementos de almacenamiento de energía eléctrica (batería y supercondensador).

3.1. Modelo

A continuación, se presenta un modelo simplificado en tiempo discreto que relaciona las señales de control con el estado de carga (SOC) de la batería y el supercondensador de la microrred descrita en la Figura 2

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + T_s \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (1)$$

donde

$$\mathbf{x}(k) = \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & \eta_2 & -\eta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_4 & -\eta_5 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

y,

$$\mathbf{u}(k) = (u_1(k) \ u_2(k) \ u_3(k) \ u_4(k) \ u_5(k))^t \quad (3)$$

donde, T_s es el tiempo de muestreo, el vector $\mathbf{u}(k)$ contiene las señales de control $u(t)$ en tiempo discreto $t=kT_s$, $(\cdot)^t$ denota transpuesta, los componentes del vector de estado $\mathbf{x}(k)$ son el SOC de la batería ($x_1(k)$) y el SOC del supercondensador ($x_2(k)$) y $\eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$ son las eficiencias de carga y descarga de la batería y del supercondensador.

Por otra parte, el balance de energía se tiene en cuenta mediante la siguiente ecuación

$$\mathbf{E}_u \mathbf{u}(k) = d(k) \quad (4)$$

donde, $\mathbf{E}_u = [1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1]$ y $d(k)$ es la demanda de la carga.

3.2. Control EMPC

Considerando que se dispone de una secuencia de predicciones de demanda de la carga en un horizonte de predicción H_p

$$d(i|k) = \hat{d}(k+i) \quad i=1, 2, \dots, H_p \quad (5)$$

El problema de control de la microrred se puede definir como el siguiente problema de optimización EMPC

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(k)} J_{EMPC}(k) \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{x}(i+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(i|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(i|k) \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{E}_u \mathbf{u}(i|k) = d(i|k) \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{u}(i|k) \in [\mathbf{u}_{\min}, \mathbf{u}_{\max}] \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{x}(i|k) \in [\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}] \quad i=1, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k)$$

donde, $\mathbf{U}(k) = (\mathbf{u}(0|k) \dots \mathbf{u}(H_p-1|k))$ es la secuencia de acciones de control óptimas. Solo se aplica la primera acción de control $\mathbf{u}(0|k)$ y luego se repite la optimización aplicando el principio del horizonte móvil e inicializando el estado inicial con los nuevos estados después de aplicar esta acción de control. Por otro lado, la función de coste $J_{EMPC}(k)$ tiene en cuenta los costes económicos asociados a cada acción de control, el índice de rendimiento del estado de carga de los dispositivos de almacenamiento y las variaciones en las señales de control (variaciones en las consignas de energía que debe producir cada elemento de la red). $\mathbf{u}_{\min}, \mathbf{u}_{\max} \geq 0$ y $\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max} \geq 0$ son los márgenes de potencia y SOC mínimos (normalmente 0) y máximos de las acciones de control y de los elementos de almacenamiento de energía.

Existen diferentes problemas a la hora de aplicar el control EMPC definido en la ecuación (6) directamente a una microrred real. Por una parte, en el modelo (1) que se utiliza en el problema de optimización, no se tienen en cuenta las dinámicas de los elementos reales de la red que pueden ser de naturaleza no lineal. Y, por otra parte, en el problema de optimización (6) se considera un conocimiento perfecto de la evolución de la demanda de la carga en un horizonte de predicción H_p . En el esquema de control propuesto en la Sección 2, los controladores de la capa de componentes serán los encargados de tratar con estos problemas. En este trabajo, se tratará con el problema de tener en cuenta errores en la predicción de la demanda siguiendo las ideas desarrolladas en (Nassourou, et al., 2020b).

3.3. Error en la predicción de la demanda

Considerando que la predicción de la demanda puede no ser perfecta en el horizonte de predicción

$$d(k+i) = d(i|k) + \Delta d(i|k) \quad i=1, 2, \dots, H_p \quad (7)$$

donde, $d(k+i)$ será la futura demanda real en el instante $k+i$ y $\Delta d(i|k)$ es el error de la predicción en la demanda para este instante de tiempo hecha en el instante k . En este trabajo consideraremos este error desconocido pero acotado

$$\Delta \mathbf{d}(i|k) \in [-\Delta d, \Delta d] \quad i = 1, 2, \dots, H_p \quad (8)$$

Una manera de tener en cuenta este posible error en la predicción de las demandas en el control de la microrred sería considerar que un controlador a nivel de componente compensará el error absorbiendo energía o entregando energía en tiempo continuo cuando la demanda real fuera mayor o menor, respectivamente, a la predicción tenida en cuenta en el modelo predictivo. Por ejemplo, si en la microrred definida en la Figura 2 se utilizara el supercondensador para compensar los errores entre la demanda real y su predicción,

$$u_4(t) = u_4(i|k) + \Delta u_4(t)$$

$$u_5(t) = u_5(i|k) + \Delta u_5(t)$$

donde,

$$\Delta u_4(t) = \begin{cases} d(i|k) - d(t) & \text{if } d(t) < d(i|k) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta u_5(t) = \begin{cases} d(t) - d(i|k) & \text{if } d(t) > d(i|k) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$t \in [(k+i)T_s, (k+i+1)T_s]$$

Entonces, el problema de optimización (6) se podría reformular como

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{U}(k)} J_{EMPC}(k) \\ & \text{s.t.} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{x}(i+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(i|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(i|k) \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{E}_u \mathbf{u}(i|k) = d(i|k) \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{u}(i|k) \in [\mathbf{u}_{\min}^R, \mathbf{u}_{\max}^R] \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{x}(i|k) \in [\mathbf{x}_{\min}^R(i), \mathbf{x}_{\max}^R(i)] \quad i=1, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k)$$

donde el margen de la potencias máxima y mínima de carga y descarga del supercondensador se modifican de tal manera que las soluciones óptimas de acciones de control $\mathbf{u}(i|k)$ y en particular las que finalmente se aplicarán al sistema en el instante k $\mathbf{u}(0|k)$, permitirán compensar mediante (9) para cualquier error de demanda (7) acotado por (8). Por lo tanto, el controlador definido por (10) se puede considerar un controlador robusto a la incertidumbre de la demanda. El nuevo margen en las acciones de control, concretamente las que afectan al supercondensador, y que permiten la robustez mencionada anteriormente son

$$\mathbf{u}_{\max}^R = (u_{1\max} \quad u_{2\max} \quad u_{3\max} \quad u_{4\max} - \Delta d \quad u_{5\max} - \Delta d)^t \quad (11)$$

Por otro lado, debido las correcciones en tiempo continuo $\Delta u_4(t)$ y $\Delta u_5(t)$ de las acciones de control calculadas por (10) y definidas en (9) que permiten la compensación en los errores de demanda, la evolución real del SOC diferirá de su predicción $x_2(i+1|k)$ $i=0, \dots, H_p$ calculada en (10). Para tener en cuenta esta diferencia en (10), se restringen los márgenes en el problema de optimización considerando los errores

máximos de predicción de la demanda en (9) y propagando su efecto de manera acumulativa, de tal manera que

$$\mathbf{x}_{\min}^R(i) = (x_{1\min} \quad x_{2\min} + i\Delta x_{2c}^0)^t \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_{\max}^R(i) = (x_{1\max} \quad x_{2\max} - i\Delta x_{2d}^0)^t$$

donde,

$$\Delta x_{2c}^0 = \Delta d T_s \eta_3 \quad \text{y} \quad \Delta x_{2d}^0 = \Delta d T_s \eta_4 \quad (13)$$

Tal y como se puede deducir de las ecuaciones (12) y (13), las restricciones en el SOC del supercondensador tienen una evolución en forma de tubo donde el margen de SOC va decreciendo linealmente en el horizonte de predicción. Dependiendo del horizonte de predicción H_p , la cota de error en la predicción de la demanda Δd y de los márgenes de SOC mínimo y máximo del supercondensador $x_{2\min}$ y $x_{2\max}$, el problema de optimización (10) puede ser infactible y por lo tanto no poder calcular ninguna secuencia de acciones de control posible.

3.4. Compensación feedback

Con el fin de suavizar la disminución de los márgenes en la evolución de la predicción del SOC, se propone implementar un controlador retroalimentado de tal manera que

$$u_4(t) = u_4(0|k+1) + \Delta u_{4x}(k+1)$$

$$u_5(t) = u_5(0|k+1) + \Delta u_{5x}(k+1)$$

$$\Delta u_{4x}(k+1) = \begin{cases} K_{fb} (x_2(1|k) - x_2(k+1)) & \text{if } x_2(1|k) > x_2(k+1) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta u_{5x}(k+1) = \begin{cases} K_{fb} (x_2(k+1) - x_2(1|k)) & \text{if } x_2(1|k) < x_2(k+1) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$t = (k+1)T_s$$

El controlador definido en (14) es un controlador en tiempo discreto y su ganancia K_{fb} se puede hallar utilizando métodos clásicos como control lineal cuadrático considerando una acción de control única para la carga y la descarga del supercondensador y una eficiencia media de carga/descarga igual a $(\eta_4 + \eta_5)/2$.

Además, para cumplir con la ecuación de balance de energía (4), la energía para cargar/descargar el supercondensador en (14) aumentará/disminuirá la energía que debe suministrar la red o pila de combustible de la microrred, de tal manera que

$$u_1(t) = u_1(0|k+1) + \Delta u_{4x}(k+1) - \Delta u_{5x}(k+1) \quad t = (k+1)T_s \quad (15)$$

Teniendo en cuenta (14) y (15) en la formulación del problema controlador EMPC, se llega al siguiente problema de optimización

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{U}(k)} J_{EMPC}(k) \\ & \text{s.t.} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\mathbf{x}(i+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(i|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(i|k) \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{E}_u \mathbf{u}(i|k) = d(i|k) \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{u}(i|k) \in [\mathbf{u}_{\min}^R(i), \mathbf{u}_{\max}^R(i)] \quad i=0, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{x}(i|k) \in [\mathbf{x}_{\min}^R(i), \mathbf{x}_{\max}^R(i)] \quad i=1, \dots, H_p-1$$

$$\mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k)$$

donde,

$$\mathbf{u}_{\min}^R(i) = (u_{1\min}(i) \quad u_{2\min} \quad u_{3\min} \quad u_{4\min} \quad u_{5\max})^t$$

$$\mathbf{u}_{\max}^R = (u_{1\max}(i) \quad u_{2\max} \quad u_{3\max} \quad u_{4\max}(i) \quad u_{5\max}(i))^t \quad (17)$$

$$\mathbf{x}_{\min}^R(i) = (x_{1\min} \quad x_{2\min} + \Delta x_{2c}(i))^t$$

$$\mathbf{x}_{\max}^R(i) = (x_{1\max} \quad x_{2\max} - \Delta x_{2d}(i))^t$$

y

$$u_{1\min}(i) = u_{1\min} + K_{fb} \Delta x_{2c}(i)$$

$$u_{1\max}(i) = u_{1\max} - K_{fb} \Delta x_{2d}(i)$$

$$u_{4\max}(i) = u_{4\max} - K_{fb} \Delta x_{2d}(i) - \Delta d$$

$$u_{5\max}(i) = u_{5\max} - K_{fb} \Delta x_{2c}(i) - \Delta d \quad (18)$$

$$\Delta x_{2d}(i) = \sum_{j=1}^i \Delta x_{2d}^0 (1 - K_{fb} \eta_4)^{j-1}$$

$$\Delta x_{2c}(i) = \sum_{j=1}^i \Delta x_{2c}^0 (1 - K_{fb} \eta_5)^{j-1}$$

donde, Δx_{2c}^0 y Δx_{2d}^0 se obtienen mediante la ecuación (13).

Como se puede observar en (18), la disminución de los márgenes en la evolución de la predicción del SOC definida por las variables $\mathbf{x}_{\min}^R(i)$ y $\mathbf{x}_{\max}^R(i)$ en el problema de optimización (16) depende de la ganancia de retroalimentación K_{fb} y ajustando adecuadamente esta ganancia, esta disminución de margen se puede atenuar considerablemente.

4. Simulaciones y resultados

Las simulaciones que se presentan a continuación consideran que el controlador EMPC de la microrred de la Figura 2 funciona con un tiempo de muestreo $T_s=1$ hora, un horizonte de predicción $H_p=24$ (un día), y que las eficiencias de carga y descarga de la batería y del supercondensador son $\eta_2=\eta_4=0.9$ y $\eta_3=\eta_5=1$. El estado inicial de carga de la batería y del supercondensador es $\mathbf{x}(0)=(0 \ 0)^t$. Se consideran escenarios de predicciones de demanda y precio de energía eléctrica de la red como los que se muestran en la Figura 3. Los problemas de optimización se han resuelto mediante el software GUROBI a través de YALMIP (Lofberg, 2004).

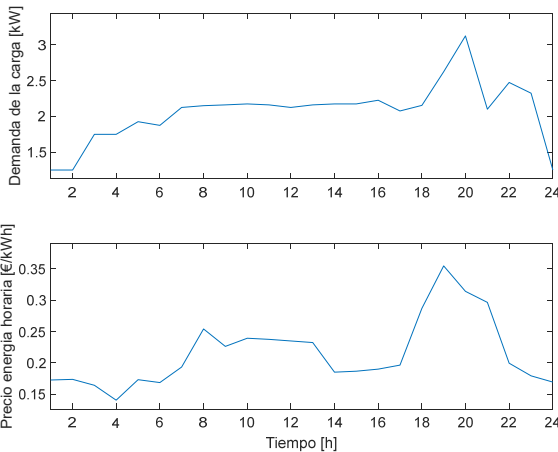


Figura 3: Perfil de demandas de la carga y evolución de precios horarios de energía de red durante un día.

Aplicando el control EMPC definido por el problema de optimización (10) se obtiene la evolución de las acciones de control que se muestra en la Figura 4, produciendo la evolución del SOC de la batería y el supercondensador que se muestra en la Figura 5.

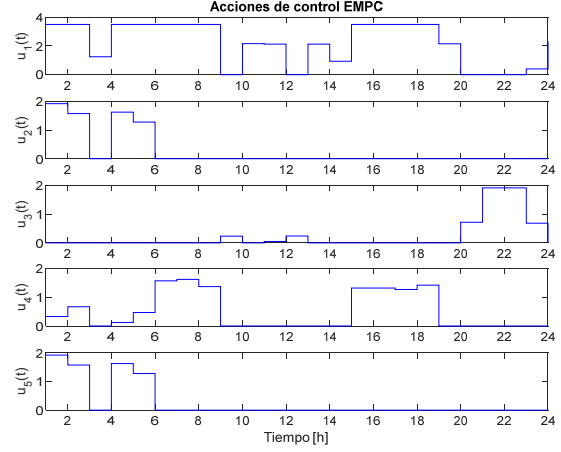


Figura 4: Evolución de las acciones de control de la microrred calculadas por el EMPC en el caso ideal.

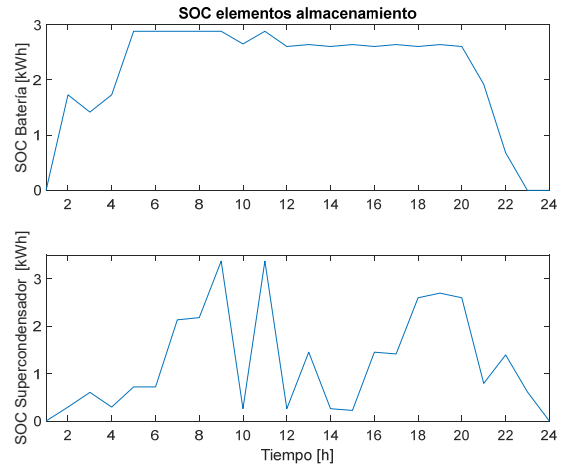


Figura 5: Evolución del SOC de la batería y el supercondensador en el caso ideal.

Considerando un error de demanda acotado de $\Delta d=0.1$ kW se aplican los algoritmos EMPC robustos definidos en (10) y en (16), obteniéndose la evolución de las acciones de control que se muestran en la Figura 6 y la evolución del SOC de la batería y el supercondensador que se muestra en la Figura 7. Por otro lado, el coste diario de funcionamiento de la red inteligente para las tres estrategias de control se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1: Coste de las diferentes estrategias EMPC

	EMPC ideal	EMPC Rob.1	EMPC Rob.2
Coste	9,891€	9,946€	9,925€

Como se puede ver en la tabla, el hecho de utilizar los controladores robustos que permiten la factibilidad de las soluciones teniendo en cuenta errores de demanda solo proporcionan un incremento de coste entre un 3% y 5% al considerar el control EMPC robusto por *feedback* (EMPC Rob.2 en la Tabla 1) y EMPC robusto definido por (10) (EMPC Rob.1 en la Tabla 1).

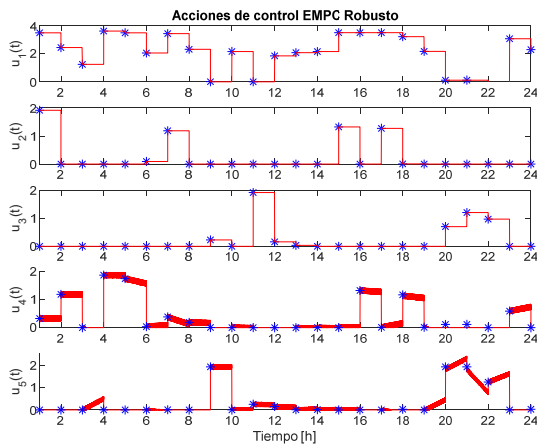


Figura 6: Evolución de las acciones de control de la microrred calculadas por el EMPC Robusto con *Feedback* en el caso de error en la predicción en la demanda.

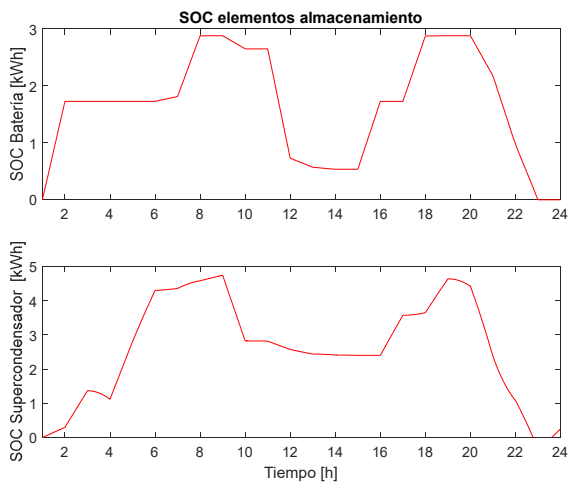


Figura 7: Evolución del SOC de la batería y del supercondensador en el caso de error en la predicción en la demanda.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una estrategia de control de redes eléctricas inteligentes que contempla los niveles de microrred y de componentes. En el nivel de microrred se ha utilizado un control EMPC que proporciona las referencias de potencias de los diferentes componentes y que mediante un control local se consiguen alcanzar. Para ilustrar el método propuesto se ha utilizado un caso de estudio basado en una microrred real de laboratorio. Después de obtener resultados satisfactorios en simulación se plantea adecuar los algoritmos desarrollados para aplicarlos a la microrred real.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto MASHED (TED2021-129927B-I00), financiado por MCIN/ AEI/10.13039/

501100011033 y por la Unión Europea Next Generation EU/PRTR.

Referencias

- Abhishek, A., Ranjan, A., Devassy, S., Kumar Verma, B., Ram, S.K. and Dhakar, A.K. (2020), Review of hierarchical control strategies for DC microgrid. *IET Renewable Power Generation*, 14: 1631-1640. DOI: 10.1049/iet-rpg.2019.1136
- Bordons, C., Garcia-Torres, F., Ridao, M.A. *Model Predictive Control of Microgrids*. Springer Cham, 2020.
- Freire, V. A., De Arruda, L. V. R., Bordons, C., & Márquez, J. J. (2020). Optimal demand response management of a residential microgrid using model predictive control. *IEEE Access*, 8, 228264-228276. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3045459
- Hooshmand, A., Malki, H. A., & Mohammadpour, J. (2012). Power flow management of microgrid networks using model predictive control. *Computers & Mathematics with Applications*, 64(5), 869-876. DOI: 10.1016/j.camwa.2012.01.028
- Hu, J., Shan, Y., Cheng, K. W., & Islam, S. (2022). Overview of power converter control in microgrids—challenges, advances, and future trends. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(8), 9907-9922. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3159828
- Hu, J. et al., "Economic Model Predictive Control for Microgrid Optimization: A Review," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 1, pp. 472-484, Jan. 2024, DOI: 10.1109/TSG.2023.3266253
- Lofberg, J. (2004). A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. *Computer Aided Control Systems Design 2004 IEEE Int. Symp.*, New Orleans, LA, USA, 2004, pp. 284-289 DOI:10.1109/CACSD.2004.1393890
- Mohammed, A., Refaat, S. S., Bayhan, S., & Abu-Rub, H. (2019). AC microgrid control and management strategies: Evaluation and review. *IEEE Power Electronics Magazine*, 6(2), 18-31. DOI: 10.1109/MPEL.2019.2910292
- Nassourou, M., Blesa, J., & Puig, V. (2020a). Optimal energy dispatch in a smart micro-grid system using economic model predictive control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 234(1), 96-106. DOI: 10.1177/0959651818786376
- Nassourou, M., Blesa, J., & Puig, V. (2020b). Robust economic model predictive control based on a zonotope and local feedback controller for energy dispatch in smart-grids considering demand uncertainty. *Energies*, 13(3), 696. DOI: 10.3390/en13030696
- Norambuena, M., et al. "Hierarchical Control Based on MPC for a Smart-Grid Including Power Distribution," *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore, 2023, pp. 1-7, DOI: 10.1109/IECON51785.2023.10311680
- Pariso, A., Rikos, E., & Glielmo, L. (2014). A model predictive control approach to microgrid operation optimization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(5), 1813-1827. DOI: 10.1109/TCST.2013.2295737
- Qi, W., Liu, J., Chen, X., & Christofides, P. D. (2010). Supervisory predictive control of standalone wind/solar energy generation systems. *IEEE transactions on control systems technology*, 19(1), 199-207. DOI: 10.1109/TCST.2010.2041930
- Zhou, L., and Preindl, M. "Hierarchical Software-Defined Control Architecture With MPC-Based Power Module to Interface Renewable Sources and Motor Drives," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 83-96, Jan. 2023, DOI: 10.1109/TSTE.2022.3202957