

FLEXIBILIDAD ENERGÉTICA EN BARRIO DE EDIFICIOS RESIDENCIALES MEDIANTE LA ACTIVACIÓN DE LA MASA TÉRMICA. RESULTADOS EXPERIMENTALES EN UN ENTORNO SEMIVIRTUAL

Salom J.*, Taddeo P.*, Casals Canals Ll.***, Bellanco I.*, Corchero C.**

- * Grupo de Energía Térmica y Edificación, IREC - Institut de Recerca en Energia de Catalunya, Jardins de les Dones de Negre, 1, Sant Adrià de Besòs, 08930, (Barcelona), España, jsalom@irec.cat
- ** Grupo de Energy Systems Analytics, IREC - Institut de Recerca en Energia de Catalunya, Jardins de les Dones de Negre, 1, Sant Adrià de Besòs, 08930, (Barcelona), España, ccorchero@irec.cat
- *** Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Carrer Jordi Girona 1, 08034, Barcelona, España

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.118>

RESUMEN

En los próximos años los edificios se convertirán en productores y consumidores de energía al mismo tiempo. Por esta razón, la gestión de la demanda a nivel de edificio y a nivel de barrio a través de un agregador independiente requerirá de sistemas de control inteligentes con el objetivo de optimizar y gestionar dos aspectos: maximizar el uso de energía renovable local y usar la energía de la red en el momento más oportuno. El presente estudio se enfoca en los resultados de un sistema de algoritmos de optimización multi-nivel testados en tiempo real. El experimento desarrollado reproduce, en dos laboratorios físicamente alejados 100 km, el comportamiento de dos edificios de un mismo barrio mediante un sistema semi-virtual donde unos modelos del edificio determinan su demanda energética emulandola en los laboratorios haciendo actuar al equipamiento físico en condiciones reales de trabajo. Los resultados muestran que la gestión inteligente de la masa térmica del edificio con los algoritmos de optimización puede aportar los mismos beneficios que instalar una batería eléctrica actuando con algoritmos inteligentes o de autoconsumo.

PALABRAS CLAVE: Flexibilidad Energética, Optimización, Masa Térmica, Sistema de gestión energética

ABSTRACT

In the coming years, buildings will become energy producers and consumers at the same time. To optimize the system operation, smart control algorithms shall manage the energy demand of an individual building and of entire districts of buildings. The algorithms goals shall maximize the use of the renewable energy produced on-site and using the energy from the electric grid at the most appropriate time. The current study focus on the results of a multilevel optimization system tested in real-time. The experiment performed reproduces, in two laboratories 100 km away, the behavior of two buildings of similar characteristics hypothetically located in the same district. This is done with energy building models which allows emulating their energy demands connected to real laboratory equipment (heat pumps, PV, batteries and management and control systems). Results of the experiments show that the smart activation of the building's thermal mass can bring similar benefits than installing an electric battery that acts following smart or self-consumption management strategies.

KEYWORDS: Energy Flexibility, Optimization, Thermal Mass, Energy Management System

INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico se enfrenta a un cambio significativo en la forma de generación y distribución de la energía. Aumentará la electricidad generada de forma distribuida mediante energías renovables, también en los edificios residenciales. Por este motivo, éstos edificios se convertirán al mismo tiempo en productores y consumidores de energía. La gestión del consumo de electricidad en los propios edificios deberá adaptarse a la disponibilidad de energía de fuente renovable generada en el mismo edificio o en la red a diferentes horas del día. Sistemas fotovoltaicos instalados en los edificios y la capacidad de introducir la energía generada in-situ en la red eléctrica representan ya una realidad en casi toda Europa (Comisión Europea, 2019). Sin embargo, el desarrollo e implementación de sistemas de gestión de la demanda inteligente que permitan la activación de la flexibilidad energética y la agregación de demanda de un número elevado de edificios, por ejemplo, un barrio entero, presenta aún muchos retos por resolver y es objeto de investigación a nivel internacional.

El presente estudio, realizado en el marco del proyecto europeo SABINA (SABINA, 2019), se enfoca en los resultados de un sistema de algoritmos de optimización multi-nivel testeados en tiempo real en los laboratorios de IREC y en un entorno semi-virtual. Los edificios en este entorno semi-virtual responden a los sistemas y algoritmos de gestión que forman parte de la solución SABINA. Como muestra la Figura 1, el sistema SABINA consiste en un agente central que obtiene y almacena la información de todos los elementos: los edificios que forman parte del distrito, el mercado eléctrico a través de una interfaz de comunicación y el sistema de predicción meteorológico. La solución de SABINA se comunica asimismo con los algoritmos de gestión a nivel de edificio (BA – Building Algorithms) y a nivel de distrito (MIDA – Market Integration District Algorithm), los cuales en función de su configuración definen consignas de actuación en los sistemas gestionables de los edificios con el objetivo de incrementar el autoconsumo de energía de origen renovable y minimizar el consumo de electricidad de la red. Los diferentes elementos mantienen una comunicación constante con el nodo central, recibiendo y enviando información cuando es necesario. La plataforma de testeo en IREC permite testear en tiempo real un sistema de gestión muy complejo y las interacciones entre los diferentes elementos de forma anticipada a su implementación en edificios reales. Por tanto, permite obtener información, no sólo de los beneficios y la viabilidad de los sistemas propuestos, sino también de su respuesta en tiempo real y sus limitaciones, que pueden irse resolviendo en este proceso experimental para la mejora de las soluciones previamente a su implementación en campo.

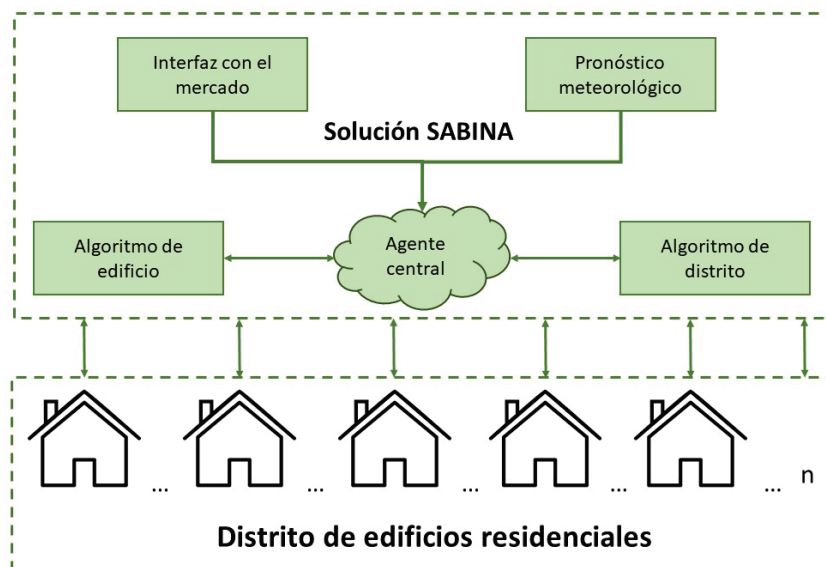


Figura 1: Esquema general del concepto de gestión de edificios en barrios y la solución SABINA.

El objetivo del presente estudio es mostrar los resultados de la actuación de los algoritmos y analizar, en un caso, la activación de la masa térmica del edificio y en el otro caso la flexibilidad energética proporcionada por una batería eléctrica comunitaria. Los escenarios considerados son explicados en el siguiente apartado.

METODOLOGIA, ENTORNO SEMI-VIRTUAL Y ESCENARIOS

Resumen del concepto

La solución SABINA consiste en un agente que actúa como el punto de comunicación central del conjunto de sistemas de la plataforma. Recoge la información del pronóstico del clima y del mercado de electricidad que necesitan los

algoritmos de edificio y de distrito, así como la información de los edificios en su estado actual. Con estos datos, los algoritmos realizan los cálculos de optimización de consumo del edificio, prediciendo la flexibilidad de los edificios, y envían los puntos de consigna para los próximos 15 minutos a los sistemas de gestión propios de cada uno de los edificios. Estos últimos finalmente comunican las consignas a los elementos controlables de los edificios involucrados.

Los algoritmos son independientes entre sí y llevan a cabo una optimización a múltiples niveles:

- BA (Algoritmo de edificio) consiste en la optimización del comportamiento energético del edificio y actúa, además, como un sistema de gestión del edificio. Su objetivo es minimizar la energía importada de la red, aumentando así el uso de energía generada in-situ (producción de energía fotovoltaica). Utiliza un modelo de optimización de control predictivo que necesita recuperar datos de pronóstico del agente central (Schubnel et al., 2020). Los equipos que pueden ser controlados por el BA y sus rangos de trabajo se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1: Elementos controlables y rangos de control

Sistema	Elementos controlables	Rango de control
Bomba de calor	Temperatura de suministro	40-55 °C
Depósitos de ACS	Temperatura inferior del depósito	35-50 °C
Batería	Carga / descarga	±4 kW
Estancias	Temperatura consigna termostato	19-25 °C

- MIDA (Algoritmo de distrito) considera la información recibida de varios edificios del mismo distrito y envía a los algoritmos de los diferentes edificios una petición de activación de flexibilidad a una hora determinada del día siguiente que puede ser de aumento o de disminución del consumo de energía (Casals et al., 2019). Estas solicitudes de activación se realizan con el objetivo de minimizar las emisiones de CO₂ del distrito y se realizan una vez al día por cada edificio. Los datos sobre el precio de la electricidad, los factores de emisión de CO₂ y el potencial de flexibilidad de los edificios (previamente calculado por el algoritmo del edificio) se recuperan del agente central.

Entorno de laboratorios semi-virtuales

El distrito de edificios se reproduce mediante la combinación de varios modelos de simulación de edificios creados en EnergyPlus. Dos edificios residenciales del distrito se emulan en los laboratorios de IREC. (Péan et al., 2019) realizan una descripción detallada de los laboratorios SEILAB y SMARTLAB. Cada edificio se emula en un laboratorio y se interconectan para intercambiar los datos climáticos y los datos de producción fotovoltaica de SEILAB (ubicado en Tarragona) a SMARTLAB (ubicado en Barcelona). Ambos edificios emulados tienen características similares, aunque hay algunas diferencias importantes. El laboratorio SEILAB incluye como componentes reales una bomba de calor agua-agua, una instalación fotovoltaica y una estación meteorológica. Los datos de SEILAB se transfieren a los modelos de edificios, mientras que el valor numérico de la temperatura de impulsión de la bomba de calor se transmite solo al modelo de SEILAB que, al evaluar la demanda térmica, devuelve la temperatura de retorno que ingresa a la bomba de calor. El laboratorio SMARTLAB incluye un edificio semi-virtual que utiliza los mismos datos meteorológicos que SEILAB. Está equipado con una batería real de iones de litio con una capacidad de 10 kWh que proporciona y recibe mediciones de potencia desde y hacia el modelo de EnergyPlus.

Los edificios simulados son representativos de un edificio plurifamiliar del período de 1991 a 2007 y siguen el código de construcción NRE-AT-87 (Tejero et al., 2018) Los dos edificios tienen la misma geometría y consisten en cuatro viviendas idénticas con dos zonas térmicas por vivienda, cada una con un nivel de ocupación diferente. Para simular la diversidad de los comportamientos de los ocupantes en edificios residenciales, los electrodomésticos y el consumo de iluminación siguen los perfiles estocásticos de los edificios mediterráneos (Ortiz et al., 2014). Entonces, los ocupantes de cada vivienda tienen un comportamiento diferente que resulta en diferentes demandas de energía. En cuanto al consumo de agua caliente sanitaria (ACS), los perfiles de extracción de ACS están basados en la normativa europea (EN16147, 2011). Esta normativa proporciona el consumo energético por diferentes usos y extracciones de agua. En este estudio, se seleccionó un perfil de extracción “medio” a una temperatura equivalente de ACS de 60°C. El perfil seleccionado ha sido adaptado a la ocupación estocástica de las personas en el edificio y al paso de simulación de los modelos.

Una parte del sistema de los edificios, se encuentra instalado físicamente en los laboratorios. La Figura 42 muestra de forma simplificada la interacción entre la parte virtual y la real en los entornos semi-virtuales. Los modelos de edificios simulan, tanto para SEILAB como para SMARTLAB, las cargas térmicas, las cargas eléctricas, el comportamiento de los ocupantes y el rendimiento del equipo térmico / eléctrico interactúan en tiempo real con los equipos reales físicamente instalados en siguiendo el concepto “hardware-in-the-loop”.

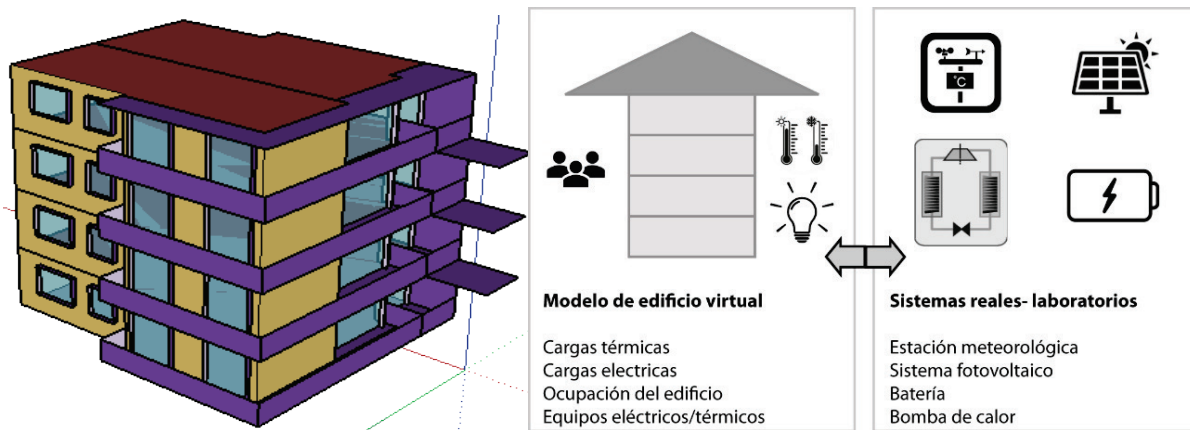


Figura 2: Configuración semi-virtual

Escenarios

En este estudio se han considerado dos escenarios diferentes. El primer escenario simula las características de un edificio de obra siendo el resultado una construcción pesada capaz de almacenar bastante calor en sus paredes. Pero, no presenta ningún elemento de acumulación de electricidad (batería). El segundo escenario, por otro lado, presenta la misma masa térmica del primer escenario y además incluye una batería eléctrica comunitaria de 10 kWh y vehículos eléctricos cuyas baterías deben cargarse en el espacio de tiempo que permanecen en el edificio. Con el objetivo de evaluar la actuación de la solución SABINA, se necesita de un escenario considerado de referencia para poder comparar los resultados. Por esta razón, por cada escenario se han realizado dos experimentos de una duración de 5 días. Los escenarios son idénticos en cuanto a las condiciones de contorno con la única diferencia del sistema de gestión que determina los puntos de consigna de los componentes controlables. La Tabla 19 resume las características de los escenarios.

Tabla 2: Escenarios considerados

Escenario	Masa térmica	Almacenamiento eléctrico	Puntos de consigna
#1 REFERENCIA	Construcción pesada	-	Programados
#1 SABINA	Construcción pesada	-	Resultados de Optimización
#2 REFERENCIA	Construcción pesada	Batería comunitaria + vehiculo electrico	Programados
#2 SABINA	Construcción pesada	Batería comunitaria + vehiculo electrico	Resultados de Optimización

En todos los experimentos se han considerado las mismas condiciones meteorológicas y estas corresponden a los días 5-9 de marzo de 2019. En Figura 43, en el eje izquierdo está representada la temperatura exterior en verde mientras en el eje derecho está representada la radiación solar.

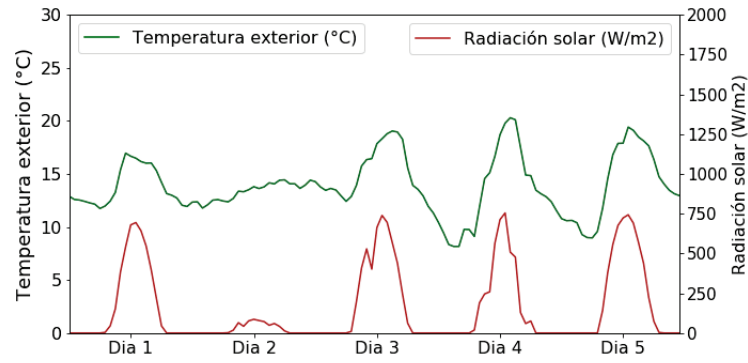


Figura 3: Condiciones meteorológicas en los experimentos

RESULTADOS

Por cuestiones de espacio, los resultados presentados son específicos de uno de los dos edificios emulados: SMARTLAB. La

Figura 44 muestra el balance eléctrico de los sistemas donde la parte negativa representa la energía que se consume en edificio más la sobrante (consumo + exportación a la red) y la parte positiva representa la energía suministrada al edificio para cubrir los consumos y la generación de energía fotovoltaica (producción PV + importación de la red). En el escenario #1 (Figura 44, a) los algoritmos de la solución SABINA, si bien provocan un pequeño incremento en el consumo del edificio, consiguen reducir la energía exportada e importada. En cuanto el escenario #2 (Figura 44, b), el consumo del edificio incrementa impactando directamente sobre la cantidad de energía importada. De todas maneras, el BA consigue mantener constante la energía exportada. Los balances eléctricos muestran que el escenario #2 presenta un consumo del edificio más elevado. Esto es coherente en cuanto el sentido que este escenario incluye el consumo de los vehículos eléctricos.

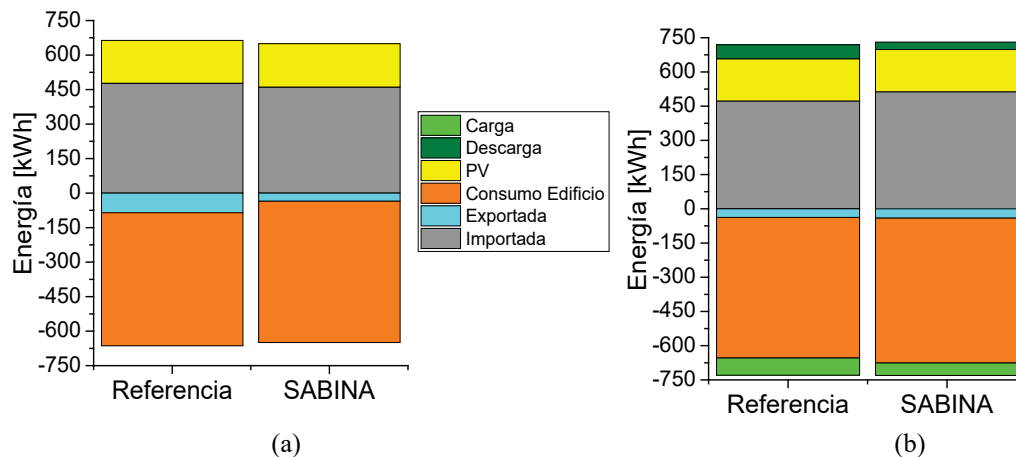


Figura 4: Escenario #1 (a) y Escenario #2 (b): Balance eléctrico

Además, destaca que la energía exportada es mayor en el escenario #1 de referencia respecto los otros experimentos. Esto se debe al hecho que el escenario #1 de referencia es el único escenario sin capacidad de almacenamiento eléctrico y sin los algoritmos de la solución SABINA que activan de forma inteligente la capacidad térmica del edificio.

El escenario #1 es interesante desde el punto de vista de la masa térmica porque no incluye una batería eléctrica y presenta una gran diferencia entre el experimento de referencia y la solución SABINA. La Figura 45 muestra las señales de consigna de temperatura de una zona para el escenario #1 durante un día. La línea roja representa la temperatura medida en el escenario #1 SABINA mientras la negra en el escenario #1 Referencia. La línea negra sigue (teniendo en cuenta la histéresis del control) las consignas programadas para la noche (de 00:00 a 06:00 y de 23:00 a 00:00) y para el día (el resto de las horas). Por otro lado, la línea roja representa la temperatura como consecuencia de los puntos de consigna recibidos por el algoritmo de edificio. En este caso, el algoritmo de edificio incrementa las consignas de los termostatos durante las horas con disponibilidad de radiación solar y, gracias a la masa térmica del edificio que es capaz de retener el calor en exceso, el sistema es capaz de reducir la energía importada cuando la producción fotovoltaica disminuye y la temperatura exterior empieza a bajar.

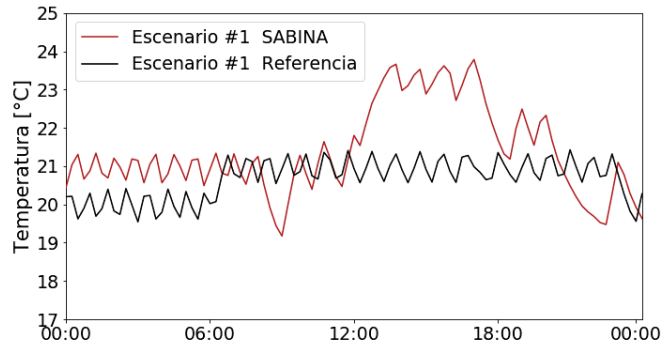


Figura 5: Comparación entre la evolución de la temperatura por efecto de las consignas en los termostatos en los escenarios SABINA y Referencia SMARTLAB #1

El indicador usado para cuantificar la variación en el consumo durante el día (durante la producción fotovoltaica) es el factor de flexibilidad, que se define en Taddeo et al. (2020). La Figura 46 muestra una representación gráfica de este indicador y su valor numérico. Por su interpretación, el indicador presenta un valor de 1 en el caso que todo el consumo se concentre en el día (disponibilidad de radiación solar) y un valor de -1 si se concentra en la noche. Las barras de color rojo indican el consumo de electricidad del edificio durante el día mientras las barras verdes durante la noche. Es evidente como la solución SABINA es capaz de desplazar el consumo hacia las horas de luz con un valor del indicador que pasa de -0.219 a -0.021.

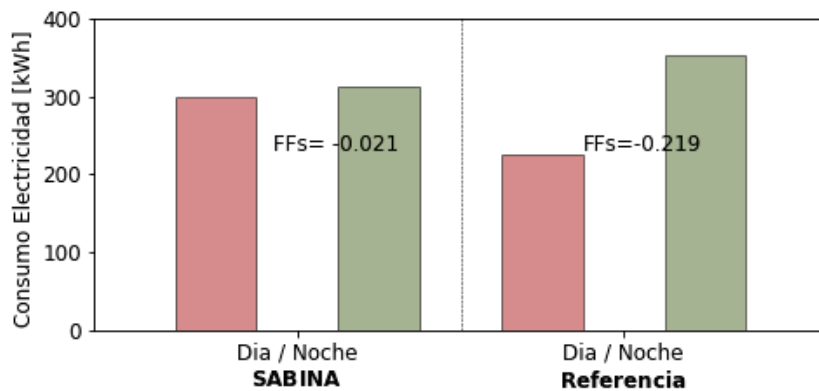


Figura 6: Factor de flexibilidad. Escenario #1

La Tabla 20 presenta los resultados numérico de todos los experimentos. Cabe destacar la mejora del factor de flexibilidad en todos los escenarios de SABINA. Sin embargo, el consumo de los edificios es siempre mayor en los escenarios de SABINA y solamente el escenario #1 presenta una disminución de la energía importada y exportada.

Tabla 3: Resultados energéticos y de flexibilidad

Escenario SMARTLAB	Importada (kW·h)	Exsportada (kW·h)	Consumo edificio (kW·h)	Factor de flexibilidad
Referencia #1	477.3	85.4	578.2	-0.219
SABINA #1	460.9	35.5	613.9	-0.021
Referencia #2	472.6	37.8	681.5	-0.105
SABINA #2	513.3	41.0	689.3	-0.015

El análisis de los resultados de los experimentos se puede complementar con las representaciones en las Figuras 7, 8 y 9. Las figuras representan la potencia intercambiada del edificio con la red eléctrica mediante una curva de duración, identificando con valores positivos la potencia importada y con valores negativos la potencia exportada. Para la creación de la curva de duración hay que ordenar de manera decreciente todos los valores de la serie temporal. En el eje horizontal está representado el porcentaje de tiempo que se está considerando. En las figuras están representadas las curvas de duración de los 4 experimentos presentados para los 5 días de duración de los mismos. Es interesante destacar como, por la gestión inteligente de la masa térmica por parte del algoritmo de edificio, el escenario #1

SABINA reduce de forma significativa la energía exportada a la red (Figura 7) y presenta prestaciones muy parecidas con el escenario #2 (que incluye baterías eléctricas) tal y como se observa en la intercomparación entre escenarios (Figura 9).

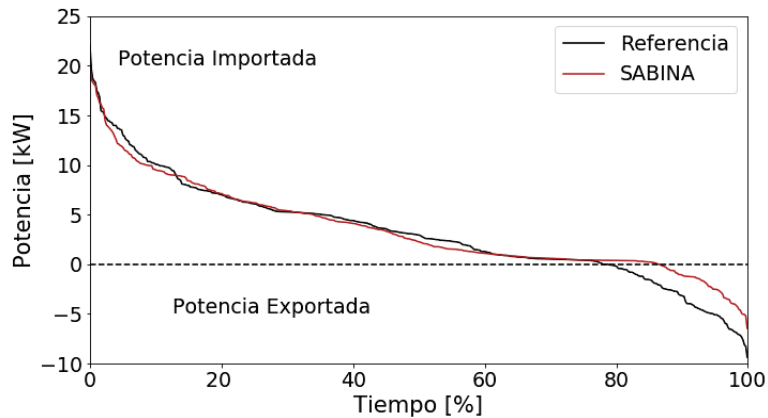


Figura 7: Curva de duración de la potencia intercambiada con la red. Escenario #1. Referencia y SABINA

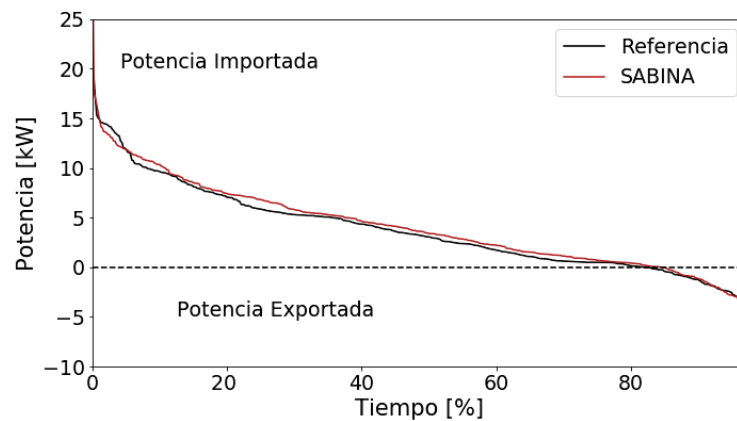


Figura 8: Curva de duración de la potencia intercambiada con la red. Escenario #2. Referencia y SABINA

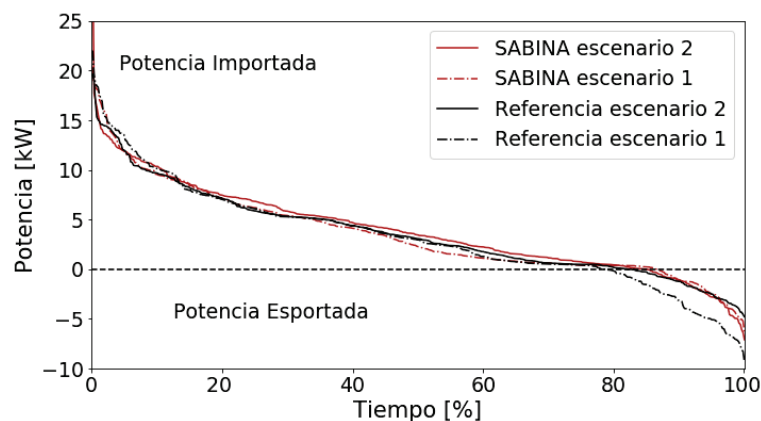


Figura 9: Curva de duración de la potencia intercambiada con la red. Escenarios #1 y #2. Referencia y SABINA

Otro aspecto interesante por destacar en las Figuras 8 y 9 es la muy pequeña diferencia entre los resultados del escenario #2 SABINA y Referencia. De hecho, el algoritmo de edificio, siendo un algoritmo de control predictivo, acaba actuando de manera muy parecida a un sistema condicional de auto-consumo típico de baterías comerciales que obedece a reglas y condiciones básicas de control: la batería se carga cuando hay exceso de fotovoltaica y se descarga si hay consumo de noche. Este comportamiento se observa en Figura 50 donde en el eje vertical se representan los valores de potencia de carga (valores negativos) y descarga (valores positivos) de la batería.

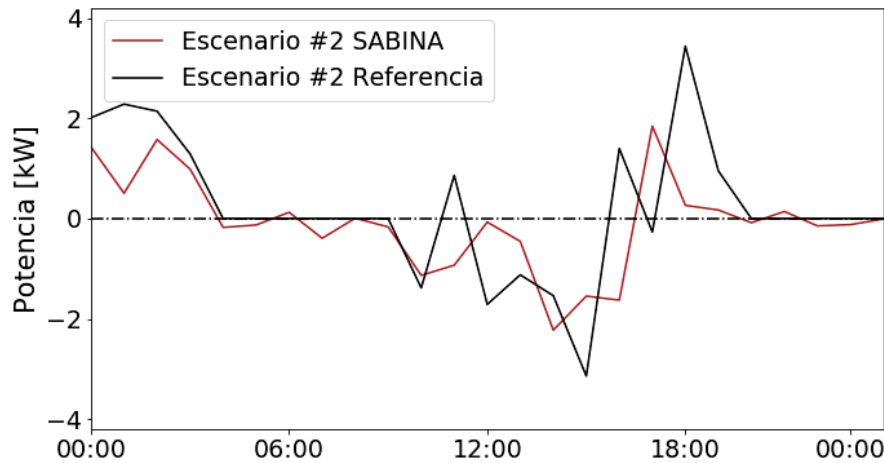


Figura 10: Carga y descarga de la batería comunitaria

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han presentado los resultados de los experimentos realizados en un entorno de laboratorio semi-virtual que testean la actuación de una solución de gestión que combina algoritmos de optimización a nivel de edificio y a nivel de distrito. El objetivo de los algoritmos es aumentar el uso de fuentes de generación renovable distribuida, minimizar el uso de energía de la red eléctrica y la reducción, a nivel de distrito, de las emisiones de CO₂ desplazando el uso de energía de la red a aquellos periodos de tiempo con una menor proporción de emisiones en el mix eléctrico. El artículo se ha centrado en analizar los resultados a nivel de la actuación de los algoritmos de edificio y como la activación de la masa térmica y los sistemas de almacenamiento eléctrico influyen en los objetivos. Las actuaciones del algoritmo a nivel de edificio en el escenario #1, que solo cuenta con la masa térmica del edificio como mecanismo de flexibilidad energética, contribuyen ad un cambio significativo en la cantidad de energía exportada gracias al desplazamiento de carga (el factor de flexibilidad energética pasa de -0.219 a -0.021 en escenario #1 y reduciendo la energía exportada a la red un 60% y la importada un 5%. de -0.105 a -0.015 en escenario #2).

Los resultados de energía importada y exportada en SABINA, es decir con control inteligente, y escenario #1 (sin batería eléctrica) son parecidos a las prestaciones del escenario #2 (con batería). Los edificios equipados con baterías comunitaria y una estrategia de control estándar (carga cuando hay exceso de producción fotovoltaica y descarga en los otros periodos), como el caso de referencia del escenario #2 actúan de manera similar al mismo sistema que funciona con la estrategia de control de SABINA. A pesar de que el factor de flexibilidad viene mejorado, lo que viene identificado como “efecto rebote” influye sobre el consumo final del edificio y/o sobre la energía importada. Por tanto, con la activación inteligente de la masa térmica del edificio con los adecuados algoritmos de optimización se obtienen resultados similares a una gestión con baterías eléctricas.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos de esta investigación han sido posibles gracias a la financiación por parte del Programa de Investigación e Innovación Horizon 2020 de la Unión Europea mediante el acuerdo nr. 731211 (SABINA - <https://sabina-project.eu/>). Los autores, Jaume Salom, Paolo Taddeo, Lluc Canals Casals y Cristina Corchero quieren mostrar su agradecimiento al soporte por parte de la Generalitat de Catalunya (2017 SGR 1219).

REFERENCIAS

Casals, L.C.; Corchero, C.; Ortiz, J.; Salom, J.; Cardoner, D.; Igualada, L.; Carrillo, E.R.; Stauffer, Y. How Building and District Algorithms Enhance Renewable Energy Integration in Energy Markets. (2019) In Proceedings of the IEEE 16th European Energy Market proceedings, Ljubljana, Slovenia, 18–20 September 2019. H2020 n°731211 SABINA - SmArt BI-directional multi eNergy gAteway Available online: <https://sabina-project.eu/> (accessed on Feb 28, 2020).

European Commission, (2017). Study on “Residential prosumers in the European Energy Union”. Available on: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/study-residential-prosumers-energy-union_en.pdf. Last access 29/07/2020.

European Standard, EN 16147, (2011). Heat pumps with electrically driven compressors-Testing and requirement for marking of domestic hot water units, January 2011.

Ortiz, J.; Guarino, F.; Salom, J.; Corchero, C. and Cellura, M., (2014). Stochastic model for electrical loads in Mediterranean residential buildings: Validation and applications. *Energy and Buildings* 80 (2014) 23-36.

Péan T., Salom J. (2019). Laboratory facilities used to test energy flexibility in buildings. *A technical report from IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings*, Second Edition.

Schubnel, B., Carrillo, R:E., Taddeo P., Casals, Ll., Salom, J., Stauffer, Y., Alet, P.J.; (2020) [State](#) Space Models for building control: how deep should you go?, *Journal of Building Performance Simulation*, 2020, (accepted for publication).

Taddeo P., Colet A., Carrillo, R:E., Casals, Ll.; Schubnel, B., Stauffer, Y., Bellanco, I., Corchero, C., Salom, J. (2020) [Management and Activation of Energy Flexibility at Building and Market Level: A Residential Case Study](#). *Energies* 2020, 13(5), 1188.

Tejero A.; Ortiz J.; Salom J. (2018). Evaluation of occupancy impact in a residential multifamily nZEB through a high resolution stochastic model. *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference*. Cambridge (UK), 11-12 September 2018.