

## HACIA DISTRITOS DE ENERGÍA POSITIVA: REDISEÑO DE UN DISTRITO MEDITERRÁNEO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS SOLARES Y LA ACTIVACIÓN DE LA FLEXIBILIDAD ENERGÉTICA

Marotta I.\*, Péan T.\*\*\*, Tamm M.\*\*/\*\*\*, Guarino F.\*, Cellura M.\*, Longo S.\*, Salom J.\*\*

\* Departamento de Ingeniería, Universidad de Palermo, Viale Delle Scienze, Edificio 9, 90128, Palermo, Italia

\*\* Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC), Jardins de les Dones de Negre 1, 08930 Sant Adrià de Besòs (Barcelona), España

\*\*\* Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectura, Universidad de Tallinn, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Estonia.

### RESUMEN

El artículo presenta el análisis de diferentes escenarios de rehabilitación energética, integración de energías renovables y activación de la flexibilidad energética en un pequeño grupo de diferentes edificios en el entorno de un puerto turístico del Mar Mediterráneo en Italia, con el objetivo de convertirlo en un “Positive Energy District” (PED). Los escenarios propuestos se basan en la simulación dinámica del distrito y analizan el efecto de las acciones que activan la flexibilidad de energía de los edificios a través de estrategias de control avanzadas del sistema de aire acondicionado. El objetivo final del estudio es mejorar la simultaneidad entre la generación local de energía y la demanda energética y reducir las emisiones de CO<sub>2eq</sub> al considerar las señales que reflejan la variabilidad ambiental del sistema eléctrico. Los resultados muestran que la acción conjunta de las estrategias de eficiencia energética y de la flexibilidad de la energía mejora la sostenibilidad ambiental del distrito y el equilibrio de los flujos de energía. Específicamente, la activación de la flexibilidad de la energía contribuye a un 10% adicional a la reducción de las emisiones operativas de CO<sub>2eq</sub> y en un 10/12% adicional de aumento del auto-consumo de energía. Los resultados de este trabajo se traducen en una serie de lecciones aprendidas que pueden extrapolarse a contextos similares en el área mediterránea.

**PALABRAS CLAVE/PALAVRAS-CHAVE:** Energía Solar, Distritos de Energía Positiva, Flexibilidad Energética, ciudad inteligente, sostenibilidad ambiental

### ABSTRACT

The article presents the analysis of several energy rehabilitation scenarios, the integration of renewable energy and the activation of energy flexibility in a small group of different buildings in the surroundings of a tourist port of the Mediterranean Sea in Italy, with the aim to transform it into “Positive Energy District” (PED). The proposed scenarios are based on the dynamic simulation of the district and analyze the effect of the actions that activate the energy flexibility of buildings through advanced control strategies of the air-conditioning system. The final goal of the study is to improve the contemporaneity between local generation of energy and load and reduce CO<sub>2eq</sub> emissions when considering signals that reflect the environmental variability of the electrical system. The results show that the joint action of energy efficiency strategies of energy flexibility improves the environmental sustainability of the district and the balance of energy flows. Specifically, the activation of energy flexibility contributes for a further 10% to the reduction of operational CO<sub>2eq</sub> emissions and for a further 10/12% to the increase in energy self-consumption. The results of this work translate into a series of learned lessons that can be extrapolated into similar contexts in the Mediterranean area.

**KEYWORDS:** Solar Energy, Positive Energy Districts, Energy Flexibility, smart city, environmental sustainability

## INTRODUCCIÓN

La investigación sobre los Distritos de Energía Positiva (Positive Energy District, PED) es un tema de gran actualidad gracias a la atención de la comunidad científica, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y las iniciativas y proyectos financiados con el objetivo de promover la difusión de los PED y favorecer la transformación de las ciudades en centros de ecoinnovación energética y ejemplos de desarrollo sostenible. Sin embargo, como se destaca en (Marotta et al., 2021), la necesidad de enfoques de gestión activa de la demanda de energía en distritos de energía positiva (Hedman et al., 2021; JPI Urban Europe, 2021) requiere esfuerzos de investigación para desarrollar y demostrar soluciones energéticas que incorporen el concepto de flexibilidad energética. En este contexto, se sitúa esta investigación que describe la rehabilitación energética según la perspectiva del PED de un distrito existente, situado en el área mediterránea (Sur de Italia). Este estudio de caso es extrapolable a otros entornos similares, por otro lado muy abundantes, de la costa mediterránea. Específicamente este artículo resume los puntos clave de un escenario de rediseño de PED del grupo de edificios comerciales presentes en el área de estudio. La investigación tiene el doble objetivo de:

- (1) analizar el potencial de rehabilitación energética del distrito, mediante la cuantificación de los impactos energético-ambientales, con el fin de contribuir a la investigación sobre los PED en el área mediterránea,
- (2) investigar el potencial de activación de la flexibilidad energética del caso de estudio en términos de interacción con la red eléctrica y reducción de la huella de carbono, considerando señales que reflejen la variabilidad ambiental del sistema eléctrico, y evaluando la influencia de la flexibilidad energética en el balance energético del PED.

## MATERIALES Y MÉTODO

El caso de estudio es un grupo de edificios comerciales (área 2040 m<sup>2</sup>, relación tamaño de hueco/pared de la envolvente exterior del 10,4%) ubicado en la zona portuaria de Licata, Sicilia. Incluye 8 oficinas, un restaurante, una pizzería, un pub-cafetería, una lavandería, una tienda y otros locales desocupados. Durante un trabajo previo de inspección se recogieron datos relativos a la geometría del distrito, ocupación y uso, sistemas instalados y consumo energético de los edificios. El distrito se ha modelizado en el entorno TRNSYS 18 y el modelo 3D realizado en SketchUp se muestra en la Figura 1. El modelo 3D contiene un total de 57 zonas térmicas, una para cada espacio de los edificios, y los elementos de protección contra la radiación solar se han introducido como elementos generadores de sombreado. Parte del modelo TRNSYS en el entorno gráfico de Simulation Studio se muestra en la Figura 2.

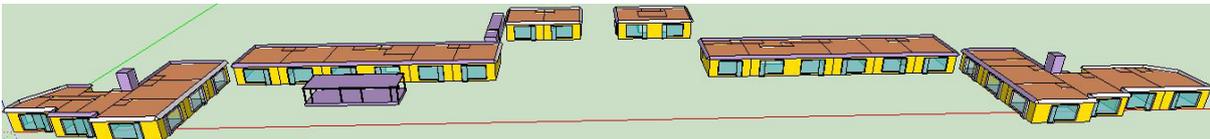


Fig. 1. Modelo 3D TRNSYS en entorno SketchUp de edificios comerciales y de oficinas.

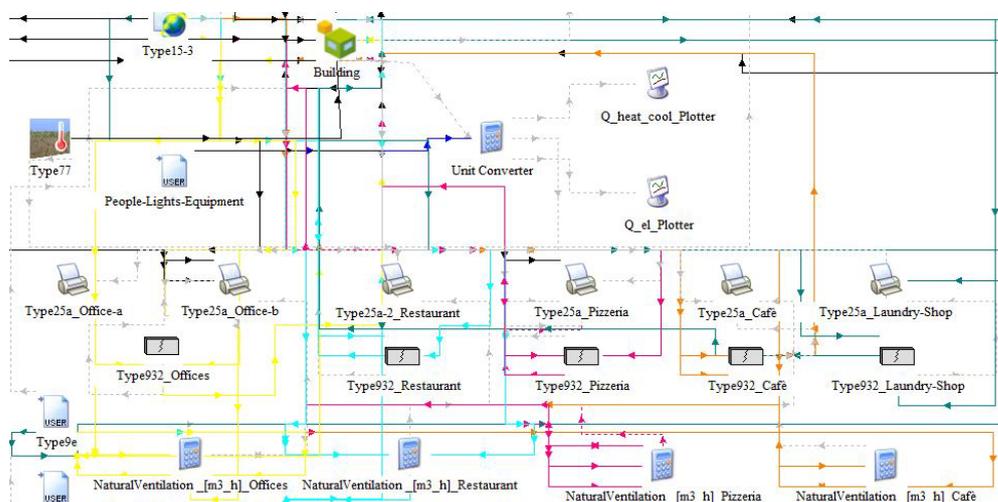


Fig. 2. Modelo TRNSYS Simulation Studio de edificios comerciales y de oficinas.

Los edificios están equipados con bombas de calor para la climatización de los espacios y están ventilados naturalmente. La modelización de la ventilación natural se ha realizado según el método “Wind and Stack with Open Area” (DOE, 2017) mientras que la infiltración se modela según el método “Sherman Grimsrud” (Type 932) en TRNSYS.

El método utilizado para el estudio y en el que se basa la rehabilitación energética del conjunto edificatorio se divide en varios pasos:

- (1) Modelado termofísico en régimen dinámico y simulación del comportamiento energético del distrito,
- (2) Calibración del modelo sobre la base de datos medidos mensualmente del consumo de electricidad de las unidades de construcción,
- (3) Eficiencia energética del modelo calibrado al aislar la envolvente del edificio, de acuerdo con los valores límite de transmitancia (Ulim) impuestos por la legislación italiana vigente (Decreto Efficienza Energetica 2020, 2020) para edificios con energía neta cero,
- (4) Integración de fuentes de energía renovable a través del dimensionamiento y modelado, en el entorno TRNSYS, de un sistema fotovoltaico (PV) en la cubiertas de los edificios,
- (5) Análisis de los resultados en términos de eficiencia energética e interacción con la red eléctrica, impacto ambiental de la fase de operación del distrito, flexibilidad energética del escenario PED según los indicadores clave Key Performance Indicators (KPIs) descritos en la Tabla 1.
- (6) Desarrollo y modelado de escenarios de flexibilidad energética basados en el control flexible del sistema de aire acondicionado utilizando algoritmos basados en reglas (Rule Based Control - RBC) y prediciendo el consumo y la producción de energía través de datos climáticos históricos. El objetivo de la investigación es mejorar la simultaneidad entre generación y carga y el impacto ambiental operativo del edificio mediante la activación de la masa térmica de la envolvente del edificio a través del control flexible del punto de consigna del aire acondicionado (Tset). Más precisamente, se probaron las estrategias de control:
  - (a) modulación al alza de la  $T_{set}$  de calefacción durante los lp periodos y modulación a la baja durante los hp periodos,
  - (b) modulación al alza de la  $T_{set}$  de enfriamiento en durante los hp periodos y modulación a la baja durante los lp periodos.La magnitud de la desviación de temperatura ( $\Delta T$ ) hacia arriba y hacia abajo es de 1 °C (escenario I) o 2 °C (escenario II).
- (7) Análisis del escenario y resultados de la discusión.

El objetivo de una estrategia de flexibilidad es provocar un desplazamiento del consumo energético (derivado de desplazar las necesidades de climatización) de periodos con una alta penalización, high penalty (hp), hacia periodos de baja penalización, low penalty (lp). adecuadamente definidos según la perspectiva medioambiental, económica o energética adoptada (Fitzpatrick et al., 2020; Marotta et al., 2020; Marotta et al., 2021; Mugnini et al., 2021; T. Péan et al., 2019; T. Q. Péan et al., 2017).

En este estudio se definen los periodos de penalización alta como aquellos periodos de tiempo en los que se produce un déficit de producción de energía del sistema fotovoltaico in situ en comparación a la demanda eléctrica del distrito. Por el contrario, los periodos de tiempo con un excedente de producción local de energía constituyen los periodos de baja penalización. Para el cálculo de la flexibilidad energética basada en emisiones, se entiende por periodos de penalización bajos aquellos en los que se produce electricidad con una huella de carbono baja y considerando la posible importación de electricidad de la red (las horas de producción principalmente a partir de energías renovables constituyen el periodo lp) y gracias a la disponibilidad de energía solar local de producción propia. Por el contrario, existen periodos de elevadas penalizaciones, los asociados a valores elevados de  $CO_{2eq}$  relativos a la importación de electricidad de la red por ser generada mayoritariamente por combustibles fósiles. La señal de penalización única se obtiene así a partir de la señal de penalización de la red y la señal de penalización relativa a cualquier exceso o déficit de energía renovable de producción propia. Luego, las dos señales convergen en una sola señal que tiene un período de penalización bajo siempre que cualquiera de las señales indique una penalización baja.

Para la evaluación de la huella de carbono del distrito, la investigación se centra en la fase de uso, calculando las emisiones de  $CO_2$  equivalente asociadas a la satisfacción de la demanda eléctrica del distrito (Marotta et al., 2021). En este sentido, se utilizaron los datos horarios históricos divulgados por el operador del mercado eléctrico italiano (Gestore dei Mercati Energetici (GME), 2021) y los factores de conversión definidos en (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014; ISPRA, 2019) para cada fuente o tecnología de generación de electricidad.

Para cuantificar el cambio de periodos hp a periodos lp, se utiliza el factor de flexibilidad FF. FF varía entre -1 (el consumo se produce sólo en periodos hp) y +1 (el consumo se produce en periodos lp). FF (emisiones) se utiliza cuando los periodos bajas emisiones se consideran como periodos lp y está vinculado al objetivo de reducir las

emisiones operativas del edificio. Por otro lado, FF (res) se refiere al objetivo de mejorar el autoconsumo de energía de fuentes renovables locales en edificios prosumer y constituyen los períodos  $l_p$  los pasos de tiempo en los que la producción excede la carga. Para evaluar la interacción con la red se utilizan el factor de autoconsumo ( $\gamma_{supply}$ ) y el factor solar ( $\gamma_{load}$ ) cuya formulación, excepto por las pérdidas de energía y almacenamiento, se muestra en la Tabla 1. El  $\gamma_{load}$  informa sobre el grado de cobertura de energía con energía solar generada en el lugar, mientras que  $\gamma_{supply}$  sobre la cantidad de la producción local de energía autoconsumida simultáneamente por el edificio.

Tabla 1. KPIs utilizados para el análisis de energía y flexibilidad

KPI	Símbolo	Ecuacione	REFERENCIA
Supply cover factor/Factor de autoconsumo	$\gamma_{supply}$	$\gamma_s = \frac{\int_0^T \min(g(t), l(t)) dt}{\int_0^T g(t) dt}$	(Salom et al., 2014)
Load cover factor/Factor solar	$\gamma_{load}$	$\gamma_l = \frac{\int_0^T \min(g(t), l(t)) dt}{\int_0^T l(t) dt} = 0$	(Salom et al., 2014)
Flexibility Factor/Factor de Flexibilidad	FF	$FF = \frac{\int_{l_p} P_{el} dt - \int_{hp} P_{el} dt}{\int_{l_p} P_{el} dt + \int_{hp} P_{el} dt}$	FF (emisiones): (T. Péan et al., 2019), FF (res): (Marotta et al., 2021)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El distrito se ha simulado en su estado actual obteniendo desviaciones mensuales para cada edificio en el rango [+10%, - 10%] con respecto a los valores medidos de consumo eléctrico anual (113.96 MWh). El modelo calibrado resultante tiene un consumo eléctrico anual de 119 MWh (0.14 MWh/m<sup>2</sup>), repartido en los distintos locales comerciales y para el servicio de energía en el escenario base como se muestra en la Figura 3.

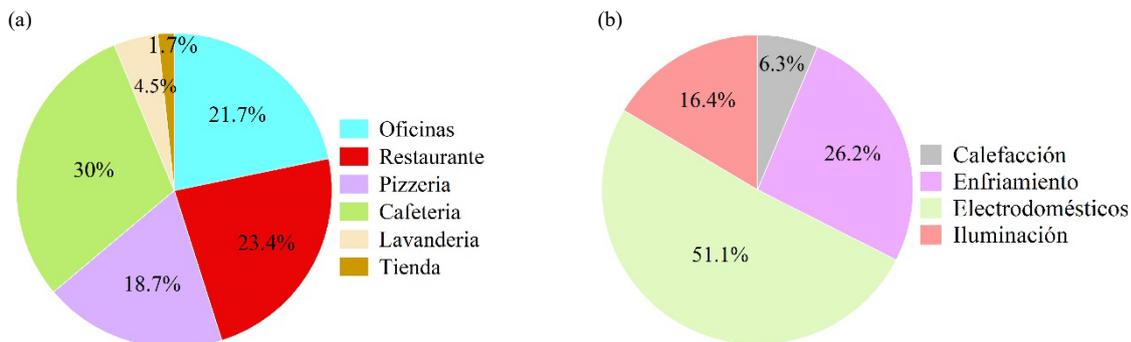


Fig. 3. Distribución del consumo anual eléctrico del distrito por edificio comercial (a) y según usos de energía (b).

Se han tenido en cuenta todos los servicios energéticos utilizados: calefacción, refrigeración, electrodomésticos (para oficinas, cocinas, etc.), iluminación interior e iluminación del área exterior de la cafetería, restaurante y pizzería. El distrito presenta un perfil de demanda eléctrica variable a lo largo del año con valores más elevados en los meses de verano. Esto se debe por un lado a la mayor cantidad de consumo de energía para refrigeración que para calefacción debido al clima del lugar y las altas cargas internas en edificios de oficinas o restauración. Por otro lado, parte de los locales funcionan exclusivamente en el período de verano, que es el más turístico del año en la zona de estudio. El FF (emisiones) es igual a -0.73, lo que indica que la demanda de energía ocurre más en los períodos  $h_p$ .

### Rediseño en una perspectiva de distrito de energía positiva

En el siguiente paso de eficiencia energética del caso de estudio, el aislamiento térmico mediante espesores adicionales de lana de vidrio (4, 8, 13, cm) determina el cumplimiento de los valores límite de transmitancia de los componentes del edificio, tal como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Límite de transmitancia antes de la rehabilitación ( $U^*$ ), límite ( $U_{lim}$ ), posterior a la rehabilitación ( $U^{**}$ ).

Componente de construcción	$U^*$	$U_{lim}$	$U^{**}$
Paredes verticales exteriores	0.73	0.38	0.378
Piso en contacto con el suelo	1.53	0.4	0.36
Cobertura horizontal	2.24	0.27	0.256
Ventanas	1.27	2.6	1.27

El modelo simulado con las modificaciones de la envolvente da como resultado un consumo anual de electricidad de 119.84 MWh. El consumo total de energía no ha disminuido significativamente en comparación con el caso base, debido al aumento en la demanda de electricidad para refrigeración, que pasa del 22% al 26% del total. Por el contrario, la contribución de la calefacción a la demanda total de electricidad pasa del 10.4% al 6.3%. En el escenario PED, una planta fotovoltaica de tamaño 86.8 kW<sub>p</sub> (280 paneles, cada uno con un área igual a 1.63 m<sup>2</sup> y una potencia nominal de 310 kW<sub>p</sub> instalados en el techo de los edificios examinados) también se incluye en el diseño de la planta y la producción anual total es de 134.65 MWh. La Figura 4 muestra los resultados mensuales de carga y generación.

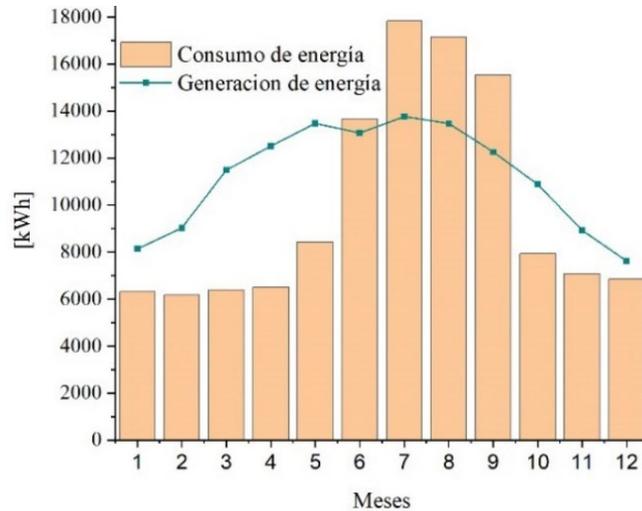


Fig. 4. Consumo y generación de electricidad en base mensual en el escenario PED.

El modelo PED tiene un balance anual energético positivo de 14.81 MWh, un autoconsumo anual de energía igual a 62.62 MWh y resulta en una reducción anual de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> operativas del 49.87% respecto al caso base.

#### Comparación de escenarios PED y contribución de la flexibilidad energética

Esta sección resume los principales resultados de las estrategias de flexibilidad energética tipo RBC y presenta una comparación de resultados entre los distintos escenarios desarrollados. La figura 5 muestra los perfiles dinámicos para dos días de invierno de la electricidad requerida para la calefacción de espacios, la electricidad producida por el sistema fotovoltaico en el caso básico de PED (escenario PED) y en el escenario de flexibilidad PED-I, de la señal de penalización (períodos de penalización baja en verde y períodos de penalización alta en blanco). Las mismas tendencias se presentan en la Figura 6 para dos días típicos de verano, excepto por el consumo de electricidad para calefacción de espacios que se reemplaza en la figura con el consumo de electricidad para refrigeración. Por otra parte, la Tabla 3 muestra los valores de KPI en el escenario base, en el escenario PED y en los escenarios de flexibilidad energética PED (I y II).

Tabla 3. Comparación de los KPIs en el escenario base, PED y en los dos escenarios PED (I y II) de flexibilidad.

Escenario	$\gamma_{supply}$	$\gamma_{load}$	FF (emissions)	FF (res)
Base	-	-	-0.73	-
PED	0.47	0.52	0.12	0.04
PED I	0.54	0.61	0.28	0.22
PED II	0.56	0.62	0.30	0.25

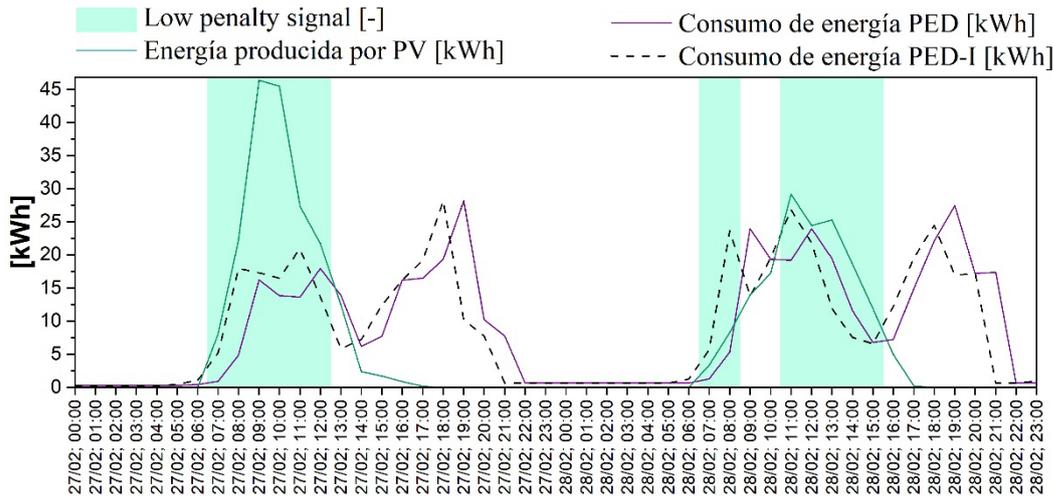


Fig. 5. Comparación de perfiles dinámicos para dos días de invierno para el escenario PED y PED-I.

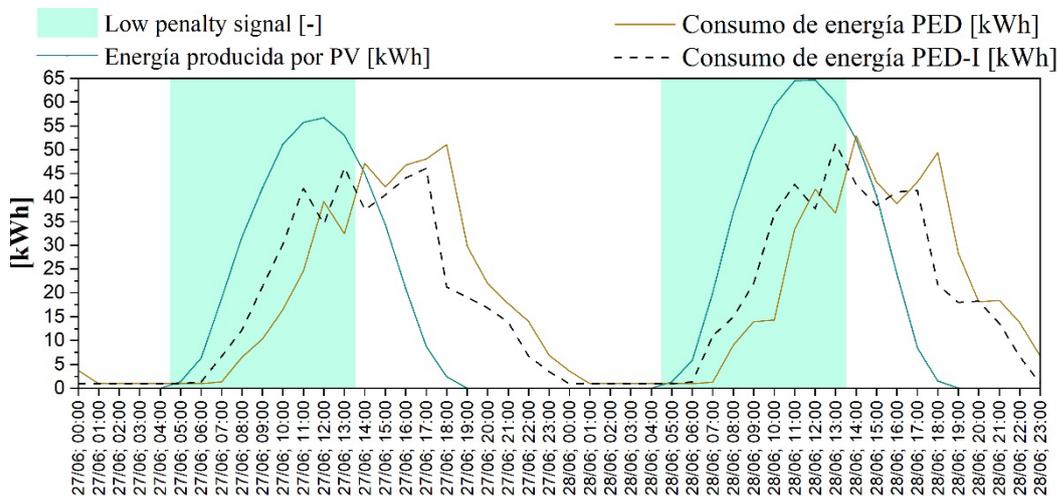


Fig. 6. Comparación de perfiles dinámicos para dos días de verano para el escenario PED y PED-I.

Como puede verse a partir de los valores de FF, la flexibilidad energética mejora en los escenarios I y II en términos de cambio de carga de los períodos de penalización alta a los períodos de penalización baja. Así lo confirma también la tendencia del autoconsumo energético anual que pasa de 62.62 MWh en el escenario PED a 73.35 y 75 MWh en los casos I y II respectivamente, mientras que las importaciones anual de electricidad de 57.21 a 46,86 y 45.43 MWh, y exportaciones de 72 a 61.31 y 59.66 MWh. La tendencia también se confirma en los valores de  $\gamma_{supply}$  e  $\gamma_{load}$  que se muestran en la tabla y por el aumento en el factor de flexibilidad FF (res), que indica un cambio de la carga de los períodos hp de déficit de energía producida por el sistema fotovoltaico. con respecto al consumo del distrito hacia los periodos lp de energía excedentaria.

El impacto en el confort térmico, como suele suceder cuando se implementan estrategias de este tipo (Marotta, Guarino, Cellura, et al., 2021; T. Q. Péan et al., 2017; Tonellato et al., 2021), varía según el tipo de espacio y edificio. En la oficina número 6 del edificio de oficinas, elegido como ejemplo, en el escenario PED I el impacto no es negativo y mejora el confort térmico de los ocupantes. En particular, considerando las categorías de confort definidas en (European Committee for Standardization, 2019), el porcentaje de horas de funcionamiento del sistema de calefacción en la categoría de confort IV (la peor) se reduce en un 8%, mientras que en las categorías III y II aumenta en aproximadamente un 2 y un 4% aproximadamente. y que en la categoría I se mantiene sin cambios. Mientras que en el escenario PED II hay una disminución de alrededor del 12% en la categoría IV y un aumento de alrededor del 10% en la categoría I.

En cuanto al impacto ambiental de las estrategias, considerando FF (emisiones), la tasa anual de consumo de energía que se produce durante los low penalty periodos aumenta en 9.74 MWh en el escenario I, y en 11.20 MWh en el escenario II si se compara con el escenario PED. La figura 7 muestra la evolución del balance de PED y la reducción anual de las emisiones de  $CO_{2eq}$  operativas respecto al caso base existente en los escenarios analizados. En este caso, la aplicación de estrategias de flexibilidad no afecta significativamente al balance PED, entendido como un mero

valor numérico de resta entre generación y consumo de energía, pero contribuye sustancialmente a la mejora de la eficiencia energética-ambiental del distrito.

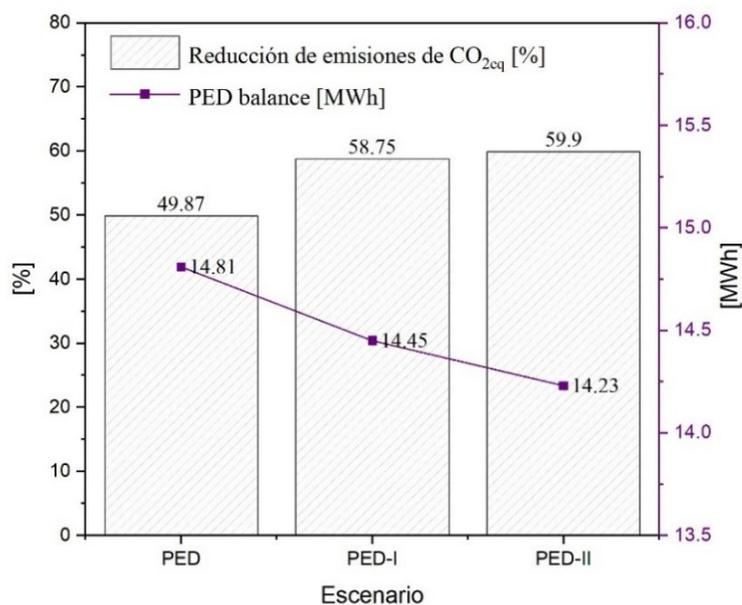


Fig. 7. Evolución del balance de PED y la reducción de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> operativas respecto al caso base.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la reurbanización energética desde una perspectiva PED de un distrito edificatorio situado en el área mediterránea con el fin de evaluar su comportamiento energético-ambiental en régimen dinámico, por un lado, y estudiar el potencial de flexibilidad energética del distrito en relación con la implementación de algunas estrategias en el otro.

Los resultados muestran que la actuación conjunta de estrategias de eficiencia energética (envolvente y aprovechamiento de la energía solar) y de flexibilidad energética mejora la sostenibilidad ambiental del distrito y el equilibrio de los flujos energéticos. De hecho, cuando se tienen en cuenta en el PED las lógicas flexibles de control del sistema de climatización de los ambientes, se consigue un margen adicional de reducción de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> operativas de aproximadamente el 10%, y contribuye a un 10/12% al aumento del autoconsumo de energía, mejorando la simultaneidad entre generación y demanda. Sin embargo, dado que el aislamiento térmico de la envolvente del edificio ha determinado un aumento significativo del consumo energético para refrigeración, también hay que destacar que la adaptación a los valores límite de transmitancia impuestos por la legislación vigente no siempre consigue un rendimiento óptimo en cuanto a eficiencia energética, especialmente en regiones con clima mediterráneo y en particular en edificios con cargas internas elevadas, como los restaurantes. Además, dado que el impacto de las estrategias de eficiencia energética y flexibilidad energética también varía en función del uso previsto del local, un análisis tanto a nivel desagregado como agregado del distrito podría ser útil para avanzar hacia soluciones optimizadas. Por otro lado, aunque la activación de la flexibilidad energética ha provocado una mejora apreciable de todos los KPIs de interacción con la red eléctrica y un aumento significativo de los FFs, el saldo PED entendido como un mero valor numérico se ve poco afectado por la implementación del control flexible. Por lo tanto, también surge la importancia de un análisis amplio y profundo de los flujos de energía y los KPI de flexibilidad, ya que un análisis parcial o basado en la mera evaluación del balance energético PED podría llevar a conclusiones engañosas. También se debe considerar que los resultados del análisis de flexibilidad correspondientes a los dos escenarios de flexibilidad I y II son muy similares entre sí. Por ello, la elección de una u otra lógica de control debería estar subordinada en este caso al impacto en el confort de cada estrategia. Dado que en general es diferente para cada espacio, ante una mejora neta del confort en el escenario II, se debe preferir este, siempre que haya una buena aceptación por parte de los usuarios.

En conclusión, los resultados de investigación de este trabajo se traducen en una serie de lecciones aprendidas que pueden extrapolarse a contextos similares en el área mediterránea y estimula las consideraciones para futuras perspectivas de investigación. En particular las perspectivas futuras debería centrarse en: (a) un enfoque multicriterio destinado a activar la flexibilidad energética en los PED, (b) ampliar la aplicación de estrategias de flexibilidad también a la parte residencial del distrito, (c) un análisis en profundidad del confort de los ocupantes con el fin de

investigar posibles impactos significativos, y d) el desarrollo de un marco de diseño holístico para PED que construya elementos de flexibilidad energética y sostenibilidad (ambiental, económica y social).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible por la financiación parcial en el marco del proyecto SYN.IKIA ([www.synikia.eu](http://www.synikia.eu)) recibida por la Unión Europea – Horizon 2020 en el marco del contrato (Grant agreement No 869918) y gracias a la colaboración entre la Universidad de Palermo (Unipa) y el puerto turístico de Licata “Marina di Cala del Sole”.

## REFERENCIAS/REFERÊNCIAS

- Decreto efficienza energetica 2020. (2020). [https://st3.idealista.it/news/archivio/2020-08/decreto\\_efficienza\\_energetica\\_2020.pdf](https://st3.idealista.it/news/archivio/2020-08/decreto_efficienza_energetica_2020.pdf)
- DOE. (2017). *Engineering Reference of EnergyPlus*. 1–1704.
- European Committee for Standardization. (2019). *UNI EN 16798-1: Energy performance of buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6*.
- Fitzpatrick, P., D’Ettorre, F., De Rosa, M., Yadack, M., Eicker, U., & Finn, D. P. (2020). Influence of electricity prices on energy flexibility of integrated hybrid heat pump and thermal storage systems in a residential building. *Energy and Buildings*, 223, 110142. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110142>
- Gestore dei Mercati Energetici (GME). (2021). *Esiti dei mercati - MGP - esiti*. <https://www.mercatoelettrico.org/it/Esiti/MGP/EsitiMGP.aspx>
- Hedman, Å., Rehman, H. U., Gabaldón, A., Bisello, A., Albert-Seifried, V., Zhang, X., Guarino, F., Grynning, S., Eicker, U., Neumann, H.-M., Tuominen, P., & Reda, F. (2021). IEA EBC Annex83 Positive Energy Districts. *Buildings*, 11(130). <https://doi.org/10.3390/buildings11030130>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. In *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416>
- ISPRA, R. 303/2019. (2019). *Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei*.
- JPI Urban Europe. (2021). *Positive Energy Districts (PED)*. <https://jpi-urbaneurope.eu/ped/>
- Marotta, I., Guarino, F., Cellura, M., & Longo, S. (2020). Energy flexibility in Mediterranean buildings: a case-study in Sicily. *E3S Web of Conferences*, 197, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019702002>
- Marotta, I., Guarino, F., Cellura, M., & Longo, S. (2021). Investigation of design strategies and quantification of energy flexibility in buildings: a case-study in southern Italy. *Journal of Building Engineering*, 41(October 2020), 102392. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102392>
- Marotta, I., Guarino, F., Longo, S., & Cellura, M. (2021). Environmental sustainability approaches and positive energy districts: A literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23), 1–45. <https://doi.org/10.3390/su132313063>
- Mugnini, A., Coccia, G., Polonara, F., & Arteconi, A. (2021). Energy flexibility as additional energy source in multi-energy systems with district cooling. *Energies*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020519>
- Péan, T., Costa-Castelló, R., & Salom, J. (2019). Price and carbon-based energy flexibility of residential heating and cooling loads using model predictive control. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101579. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101579>
- Péan, T. Q., Salom, J., & Ortiz, J. (2017). Potential and optimization of a price-based control strategy for improving energy flexibility in Mediterranean buildings. *Energy Procedia*, 122, 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.292>

Salom, J., Marszal, A. J., Widén, J., Candanedo, J., & Lindberg, K. B. (2014). Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with simulated and monitored data. *Applied Energy*, *136*, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.018>

Tonellato, G., Heidari, A., Pereira, J., Carnieletto, L., Flourentzou, F., Carli, M. De, & Khovalyg, D. (2021). Optimal design and operation of a building energy hub : A comparison of exergy-based and energy-based optimization in Swiss and Italian case studies. *Energy Conversion and Management*, *242*, 114316. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114316>