

Abordando la pobreza energética de manera integrada. Una caracterización interdisciplinar de los hogares vulnerables españoles y propuesta para implementar soluciones técnicas y regulatorias viables

*Roberto Barrella**

Resumen

La Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética, presentada en abril de 2019, ha abierto el camino para un enfoque integral de la pobreza energética en España. Sin embargo, para una efectiva aplicación de las políticas propuestas en la estrategia, es necesario un estudio en profundidad que analice las múltiples dimensiones de este problema social y oriente al legislador en la aplicación de medidas eficientes.

En este contexto, uno de los objetivos de esta tesis es caracterizar la realidad energética de los hogares vulnerables en España y revisar críticamente los indicadores de pobreza energética tradicionalmente utilizados, proponiendo otros alternativos. Paralelamente a dicho objetivo, esta tesis analiza y propone soluciones técnicas y políticas viables que aborden la precariedad energética de los hogares.

Es importante señalar que esta investigación incluye los resultados de diferentes colaboraciones transdisciplinarias, entre otras el dialogo constante con los miembros del Consejo Asesor y del Comité Ejecutivo de la Cátedra de Energía y Pobreza y la colaboración multidisciplinar con ENGAGER (Energy Poverty Action: Agenda Co-Creation and Knowledge Innovation) COST Action.

Palabras clave: pobreza energética, indicadores, soluciones alternativas de climatización, eficiencia energética, políticas sociales.

* Cátedra de Energía y Pobreza e Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), Universidad Pontificia Comillas.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la energía se suele conceptualizar como un bien básico para el pleno desarrollo humano, así como una cuestión estratégica y geopolítica. De hecho, la falta de energía asequible hace que las personas no puedan llevar una vida digna ni participar adecuadamente en la sociedad. Por lo tanto, abordar esta privación de energía mejorando la asequibilidad y el acceso de las personas a este bien básico es una de las cuestiones sin resolver del mundo moderno. Esto no debe considerarse sólo como una cuestión personal, sino como un deber de la sociedad de garantizar el acceso a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, como se indica en el 7º Objetivo de Desarrollo Sostenible de la ONU (ODS7).

En los países desarrollados, la vulnerabilidad energética es una expresión de los problemas socioeconómicos de los sistemas energéticos, donde la pobreza energética sería una manifestación de estas debilidades. Además, la pobreza energética podría identificarse como una faceta de la pobreza general. De hecho, la primera debería estudiarse en relación con la pobreza económica, ya que esta posición de vulnerabilidad energética está estrechamente vinculada a un bajo nivel de ingresos. Sin embargo, la pobreza energética también está causada por factores específicos como los altos precios de la energía, la baja eficiencia energética de las viviendas y la falta de información sobre las implicaciones del uso final de la energía, que son condiciones particulares que pueden afectar a la capacidad de las personas o de las familias para satisfacer sus necesidades energéticas domésticas o para acceder a mejores condiciones de mercado. Por lo tanto, abordar esta cuestión de forma integrada tendría enormes beneficios tanto para los individuos como para la sociedad.

Partiendo de esta premisa, la tesis contribuye a la literatura sobre la pobreza energética en un país desarrollado como España en estrecha relación con el contexto europeo. Este recorrido científico comienza explorando cuándo y cómo se reconoció este problema social en Europa e identificando los estudios y políticas que han intentado definir, medir y abordar la pobreza energética en España y algunos países vecinos (Reino Unido, Francia y Portugal). A partir de este proceso de revisión, se identifican las lagunas en la literatura y en las políticas, planteando así algunas cuestiones pendientes y no abordadas que conducen a la

definición del objetivo general de la tesis, que es mejorar el conocimiento sobre la medición y la lucha contra la pobreza energética en el país del caso de estudio en el marco de la UE.

En esta línea, este artículo resume las aportaciones de dicha tesis en los cuatro diferentes desafíos de investigación que se plantearon para alcanzar el objetivo principal:

- Caracterización energética de los hogares españoles.
- Revisión crítica y propuesta de indicadores de pobreza energética.
- Análisis de la viabilidad técnico-económica de soluciones alternativas de climatización y eficiencia energética en hogares vulnerables.
- Evaluación y propuesta de políticas para luchar contra la pobreza energética.

Tal y cómo se menciona arriba, cada uno de estos objetivos se desglosa en un capítulo de la tesis, que está estructurada para garantizar una narrativa coherente que va desde la caracterización de las necesidades energéticas de los hogares hasta la evaluación de la eficacia de las diferentes soluciones políticas, utilizando también los resultados del primer análisis para proponer nuevos indicadores de pobreza energética y analizar la viabilidad de soluciones tecnológicas alternativas para combatir la pobreza energética en viviendas en bloque. A continuación, se resumen las principales conclusiones de la revisión del estado del arte (sección II), se describen la metodología y los resultados más destacados de cada uno de los capítulos de la tesis (secciones III-VI), terminando con las conclusiones generales y el trabajo futuro (sección VII).

2. CONTEXTO Y ANTECEDENTES EN LA DEFINICIÓN, MEDICIÓN Y EL ABORDAJE DE LA POBREZA ENERGÉTICA

El segundo capítulo de la tesis analiza el reconocimiento de la pobreza energética doméstica como un problema en Europa y presenta el estado del arte de los principales temas relacionados con los cuatro subobjetivos de la tesis. Después

de analizar las metodologías identificadas y los estudios propuestos para modelar las necesidades energéticas de los hogares, se lleva a cabo una revisión crítica de los principales indicadores de pobreza energética de la literatura y oficiales. Además, en el mismo capítulo se revisan los estudios más relevantes sobre las medidas de eficiencia energética activa/pasiva de las viviendas y se analizan las políticas de pobreza energética implementadas en diferentes países europeos (Reino Unido, Francia, Portugal y España). A la luz de la mencionada revisión, se señalan las lagunas bibliográficas para enmarcar las aportaciones de la tesis:

- El análisis de los estudios existentes sobre demanda energética doméstica sugiere que la modelización del gasto energético de los hogares debe considerar el clima, las características estructurales de la vivienda (Brounen, Kok y Quigley, 2012), la composición del hogar (Wolff *et al.*, 2017) y otras variables sociodemográficas que puedan influir en su carga energética. En este sentido, hasta donde el autor sabe, en España no se ha propuesto ningún modelo exhaustivo del gasto doméstico de energía térmica y eléctrica requerido (similar al BREDEM inglés [Henderson y Hart, 2013]) y no se ha analizado su aplicación a los hogares vulnerables españoles con anterioridad a este trabajo.
- En cuanto a los indicadores objetivos de pobreza energética, las métricas “tradicionales” suelen centrarse en la dimensión del gasto desproporcionado, estimando así la llamada “pobreza energética medida” (Meyer *et al.*, 2018). Por otro lado, las circunstancias de la “restricción (auto)impuesta” del gasto energético (infragasto (Brunner *et al.*, 2012), (Anderson, White y Finney, 2012), (Lampietti y Meyer, 2002), (Stojilovska, Yoon y Robert, 2021)) no se han abordado adecuadamente, tanto en los indicadores oficiales como en las políticas (Meyer *et al.*, 2018; Charlier y Legendre, 2021). En particular, en los estudios europeos analizados (por ejemplo, EU Energy Poverty Observatory, 2020; Antepara *et al.*, 2020), y, en particular, en todos los trabajos relativos a España (Tirado Herrero *et al.*, 2018; Romero *et al.*, 2015), no se considera esta “cara oculta” de la pobreza energética o la métrica propuesta no incluye una caracterización del gasto energético necesario de los hogares.
- La viabilidad tecnoeconómica de tecnologías alternativas como las bombas de calor centralizadas aplicadas a los hogares vulnerables españoles no ha sido

suficientemente estudiada en la literatura anteriormente analizada. En este sentido, un tema de investigación inexplorado es la evaluación del rendimiento de la producción de agua caliente con bombas de calor aerotérmicas, tanto de accionamiento eléctrico (Neirotti, Noussan y Simonetti, 2020) como de gas (Abuheiba *et al.*, 2017; The Carbon Trust y Rawlings Support Services, 2016) y su viabilidad económica como medida estructural contra la pobreza energética en bloques de viviendas.

- La revisión de las políticas señala que, para abordar eficazmente la pobreza energética, es necesario diseñar una estrategia integrada que incluya tanto medidas de mitigación como estructurales (Dobbins *et al.*, 2019). Por otra parte, la medición del impacto de cada política sobre la pobreza energética es una tarea muy compleja que no ha sido abordada con frecuencia por los estudiosos (García Álvarez y Tol, 2020; Bagnoli y Bertoméu-Sánchez, 2022). En particular, en el caso español no se ha evaluado la eficacia del bono térmico y los análisis de las políticas estructurales realizados en estudios anteriores no incluyen una evaluación de su impacto sobre la pobreza energética (Ministerio de Transporte Movilidad y Agenda Urbana, 2020).

3. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HOGARES ESPAÑOLES

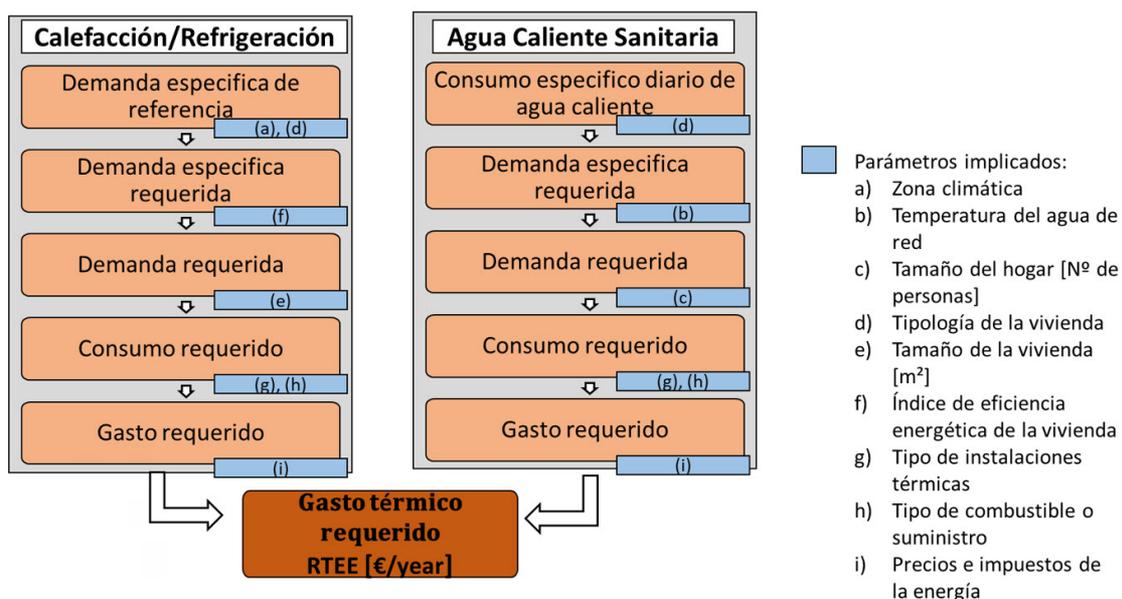
3.1. Metodología y resultados

En el tercer capítulo de la tesis se presenta un modelo de abajo a arriba para estimar el gasto energético teórico de los hogares españoles en función de sus características, modelo que fue seleccionado como referencia en la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024 (ENPE). En concreto, este modelo se desarrolló para evaluar el Gasto Energético Requerido (*RENE*, en su sigla inglesa) de cada hogar español, es decir, el gasto energético teórico que un hogar tendría que abonar para satisfacer sus necesidades energéticas, incluyendo tanto los usos térmicos como los eléctricos. Las necesidades térmicas requeridas se estiman aplicando el submodelo de Gasto Térmico Requerido (*RTEE*, en su acrónimo en inglés), que se basa en el Código Técnico de la Edificación (CTE)

(Ministerio de Fomento, 2019) y calcula los costes requeridos para la calefacción/refrigeración de espacios y la preparación de agua caliente sanitaria teniendo en cuenta características básicas del hogar y de la vivienda, como la zona climática de la localidad de residencia, la antigüedad de la vivienda y su superficie (tamaño de la vivienda), y el tamaño del hogar. La figura 1 resume la metodología empleada para el cálculo del *RTEE*, entendido como suma del gasto requerido en climatización y agua caliente sanitaria (*ACS*).

Figura 1

Metodología empleada y variables de ingreso del cálculo del Gasto Térmico Requerido (*RTEE*)

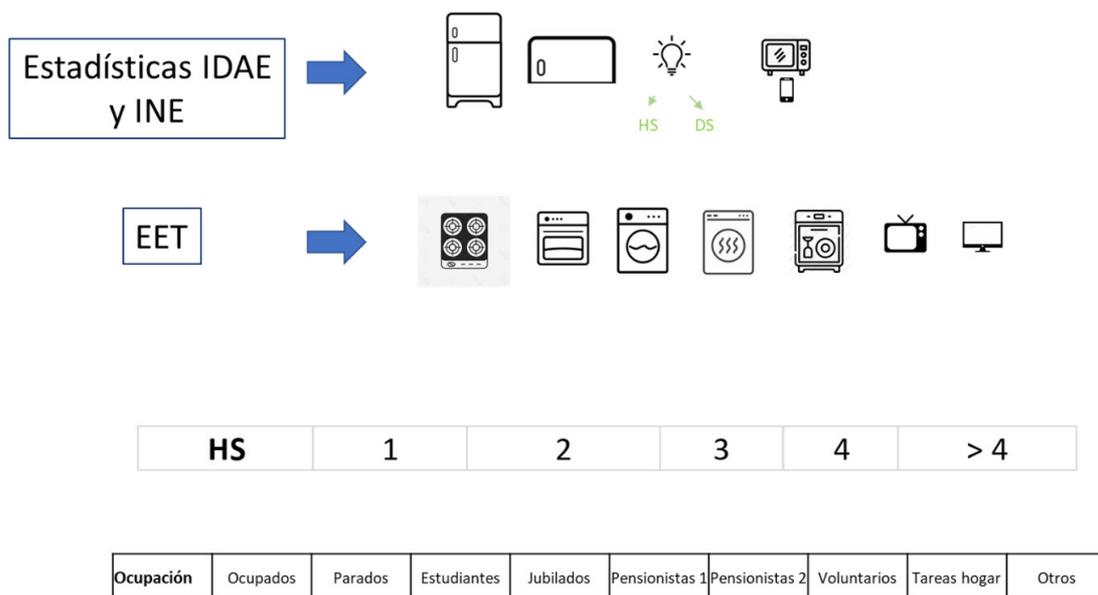


La superficie de la vivienda y el tamaño del hogar se emplean también como variables de entrada del submodelo de Gasto Eléctrico Requerido (*RELE*, en su sigla inglesa), que estima los costes anuales de energía doméstica para usos eléctricos no térmicos, es decir, iluminación, electrodomésticos y cocina. En una primera versión del modelo (“simplificado”), las estadísticas del proyecto SPAHOUSEC II del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2019) se emplean para modelar el consumo mensual de los diferentes usos eléctricos. Posteriormente, en la versión avanzada de este

modelo se tiene en cuenta la composición del hogar (en concreto, la ocupación de sus miembros) que ha sido señalada en la literatura (por ejemplo, Brounen, Kok y Quigley, 2012)) como un factor clave que determina el comportamiento energético del hogar. La figura 2 resume la metodología empleada para el modelo avanzado de *RELE*. El proyecto SPAHOUSEC II y estadísticas específicas del Instituto Nacional de Estadística (INE) se utilizaron para modelar el consumo energético de cada uno de los electrodomésticos que aparecen en la figura 2. En particular, de la *Encuesta de Empleo de Tiempo (EET)* del INE se extrapolaron las actividades a lo largo de un día típico relacionadas con el uso de siete de los once electrodomésticos incluidos en el modelo: cocina eléctrica (fogones), horno, lavadora, secadora, lavavajillas, televisor y ordenador. En cuanto a los demás electrodomésticos (frigorífico, congelador, iluminación y otros), se modeló su consumo mensual, es decir, no se discretizó el consumo de forma horaria. Además, se consideraron cinco tipologías diferentes de tamaño del hogar (*HS*, en su sigla inglesa) y nueve categorías de ocupación para los miembros del mismo.

Figura 2

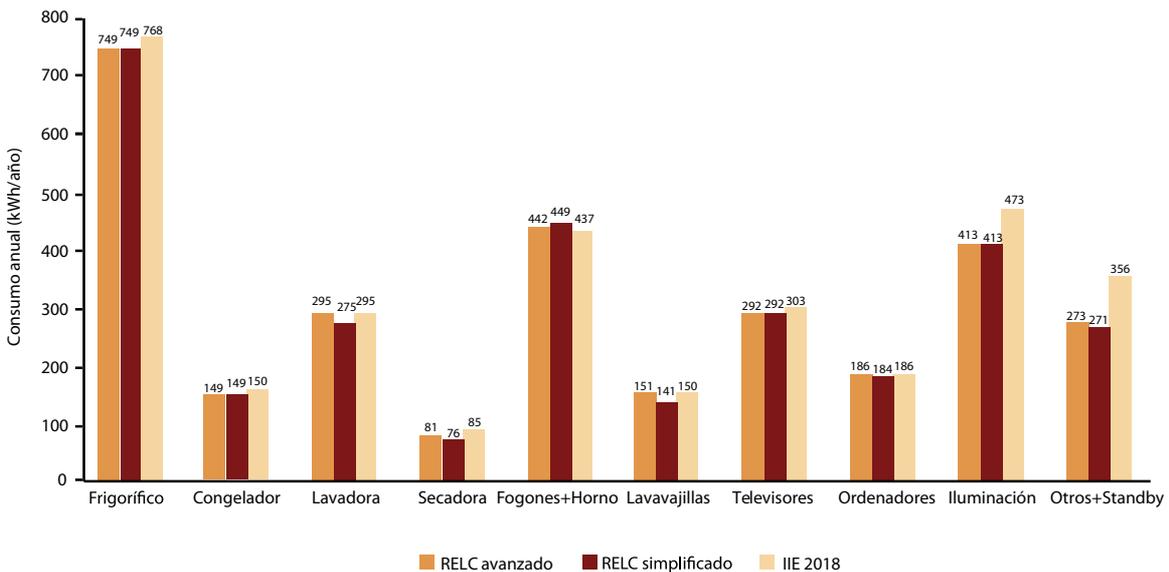
Metodología empleada para el modelo avanzado de Gasto Eléctrico Requerido (*RELE*)



Los resultados de consumo por electrodomésticos de ambos modelos (“simplificado” y “avanzado”) se muestran en la figura 3 que los compara con estadísticas nacionales (IEE, 2018; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2020).

Figura 3

Comparación entre el consumo anual de los electrodomésticos para el “hogar medio de 2019” en los modelos RELC Simplificado y Avanzado, y los valores estadísticos del IEE 2018



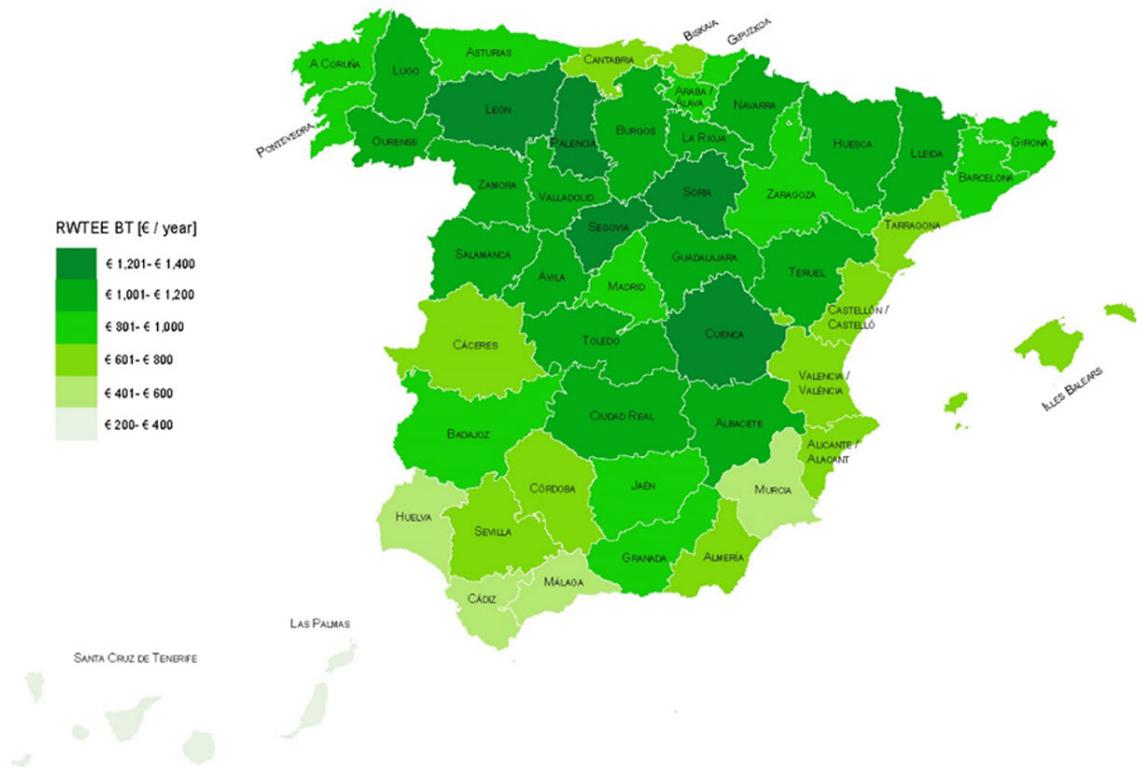
El modelo *RENE* se propone como una herramienta para mejorar el “diagnóstico energético” en los estudios de pobreza energética. En este sentido, se presentan en la tesis algunos de sus usos directos e indirectos (estos últimos se presentan en los Apartados 4-6). En cuanto a las aplicaciones directas, la tesis emplea el modelo para analizar los gastos relacionados a las “necesidades energéticas invernales”¹ (*RWTEE*, en su sigla inglesa) de los hogares españoles a nivel provincial. El mapa 1

1 Por “invernales” se entienden las necesidades de calefacción durante el invierno (octubre a mayo, acorde al procedimiento establecido en el CTE [Ministerio de Fomento, 2019]) y preparación de agua caliente sanitaria durante todo el año.

muestra los resultados de este análisis sin impuestos (*BT*, en su sigla inglesa). Los valores de *RWTEE* para Ceuta y Melilla (que no se aprecian en el mapa 1), son, respectivamente, 628 euros y 503 euros.

Mapa 1

Resultados provinciales de gasto térmico invernal requerido antes de impuestos (*RWTEE BT*)



Fuente: Reimpreso de Barrella *et al.* (2021).

Dentro de sus aplicaciones directas, también se realiza una caracterización energética de una muestra de familias vulnerables atendidas por una ONG española (ECODES). En particular, se ha aplicado el modelo *RWTEE* a los datos de hogares recogidos en el programa “Ni un hogar sin energía” de ECODES para proporcionar información sobre su gasto térmico requerido según las características de los mismos. Dicha información podría resultar valiosa tanto para los hogares mismos (en su mayoría vulnerables) como para los agentes involucrados en acción

social contra la pobreza energética y mejora de la eficiencia energética. El mismo objetivo se ha perseguido a través de la aplicación del modelo *RELE* a la misma muestra de hogares, añadiendo también una comparación con su consumo real. Finalmente, se describe la implementación del modelo en una herramienta de evaluación de los gastos energéticos de los hogares vulnerables (y no vulnerables) promocionada por ECODES.

3.2. Conclusiones

De las aplicaciones directas del modelo *RENE* presentadas en el tercer capítulo de la tesis se deducen valiosos resultados y conclusiones:

- El *RWTEE* depende principalmente de la zona climática de la localidad de residencia, de las prestaciones de la envolvente edificatoria, del equipamiento térmico, del tamaño de la vivienda y del hogar. De hecho, el gasto requerido medio nacional en 2019 para calefacción y ACS es de 1.055 euros al año, pero el de la provincia más fría (León) es casi tres veces superior al de la segunda provincia más cálida (Cádiz) y seis veces superior al de la provincia más cálida (Las Palmas). Además, en los climas fríos, la elección del suministro para usos térmicos y del equipamiento tiene un alto impacto en el gasto. En concreto, entre las tecnologías convencionales analizadas, las bombas de calor aire-aire accionadas eléctricamente y las calderas centralizadas de gas natural son las que conllevan el menor gasto térmico requerido.
- El *RELE* de un hogar español, de 624 euros de media en 2019 (con una tarifa PVPC sin discriminación horaria), está influenciado principalmente por su tamaño y composición. Respecto a esta última, las familias con desempleados o jubilados, pensionistas por otros motivos y trabajadores domésticos en general tienen un consumo eléctrico teórico mayor. Por otro lado, tres electrodomésticos destacan como los asociados a un mayor consumo de electricidad: el frigorífico, el congelador y la cocina. Las familias de la base de datos ECODES son en su mayoría vulnerables, por lo que tienden a utilizar menos los electrodomésticos que las “familias con ingresos medios” por preocupación por la factura. Por otro lado, la diferencia de consumo no es muy elevada porque suelen poseer electrodomésticos poco eficientes y de mayor consumo.

- Los “factores externos” que también podrían afectar significativamente al gasto energético doméstico requerido son los precios de la energía y la fiscalidad, que se analizan cuidadosamente en la tesis (por ejemplo, incluyendo un escenario “antes de impuestos” para los consumidores vulnerables) y cuya preocupación es creciente debido a la actual crisis energética iniciada en 2021.

4. UN NUEVO INDICADOR PARA MEDIR LA POBREZA ENERGÉTICA OCULTA

4.1. Metodología y resultados

En el cuarto capítulo de la tesis se presenta una metodología novedosa para estimar el alcance y la profundidad de la pobreza energética oculta (indicador *HEP*, en su acrónimo en inglés), entendida como un problema de gasto insuficiente en el hogar debido a la falta de asequibilidad de los servicios energéticos. El enfoque propuesto requiere la aplicación de dos criterios. El primero permite estimar la proporción de hogares con bajo gasto energético absoluto (gasto energético insuficiente) aplicando un umbral basado en el modelo *RENE*. El segundo, basado en un umbral de ingresos, filtra (de la primera muestra) a las familias o individuos que tienen un bajo consumo debido a un problema de asequibilidad, es decir, identifica la proporción de hogares en situación de pobreza energética oculta (extensión del *HEP*). Además, la brecha de pobreza energética (profundidad del *HEP*) se calcula como la diferencia media entre el umbral de gasto energético absoluto y el gasto energético real de los hogares en situación de pobreza energética. Finalmente, se realiza la elevación estadística de esta cantidad al conjunto de los hogares en pobreza energética en el país para proporcionar una referencia del presupuesto nacional necesario para una política de mitigación de la pobreza energética oculta.

En cuanto al umbral de gasto energético absoluto, se optó por tomar el *RENE/2* después de analizar la distribución del gasto energético por deciles de renta. Esta elección se alinea con la literatura sobre pobreza energética oculta (Meyer *et al.*, 2018). A continuación, este capítulo presenta cinco análisis desagregados sobre la extensión de la pobreza energética oculta. En el primero, los hogares de la *EPF*

se agrupan por comunidades autónomas (CC. AA.) para analizar las diferencias climáticas y socioeconómicas. El segundo análisis desagregado estima la extensión del *HEP* según el tamaño del hogar, analizando así la influencia del número de miembros del hogar en esta cuestión social. El tercero analiza la influencia de la antigüedad del edificio (como aproximación de la eficiencia energética de su envolvente térmica) en la pobreza energética oculta. El cuarto y el quinto análisis desagregado profundizan en dos características que se han sugerido en la literatura como influyentes en la pobreza energética, es decir, el régimen de tenencia de la vivienda (propia o alquilada) (Bouzarovski, Burbidge y Stojilovska, 2020) y el grado de urbanización de la localidad (zonas urbanas o rurales) (Scarpellini *et al.*, 2019).

Centrándonos en el año de referencia (2019), el mapa 2 muestra la media regional ponderada del *RENE*. Los valores del *RENE* para las dos ciudades autónomas que

Mapa 2

Media regional ponderada del RENE por hogar en 2019 (€/año)

RENE [€/year]



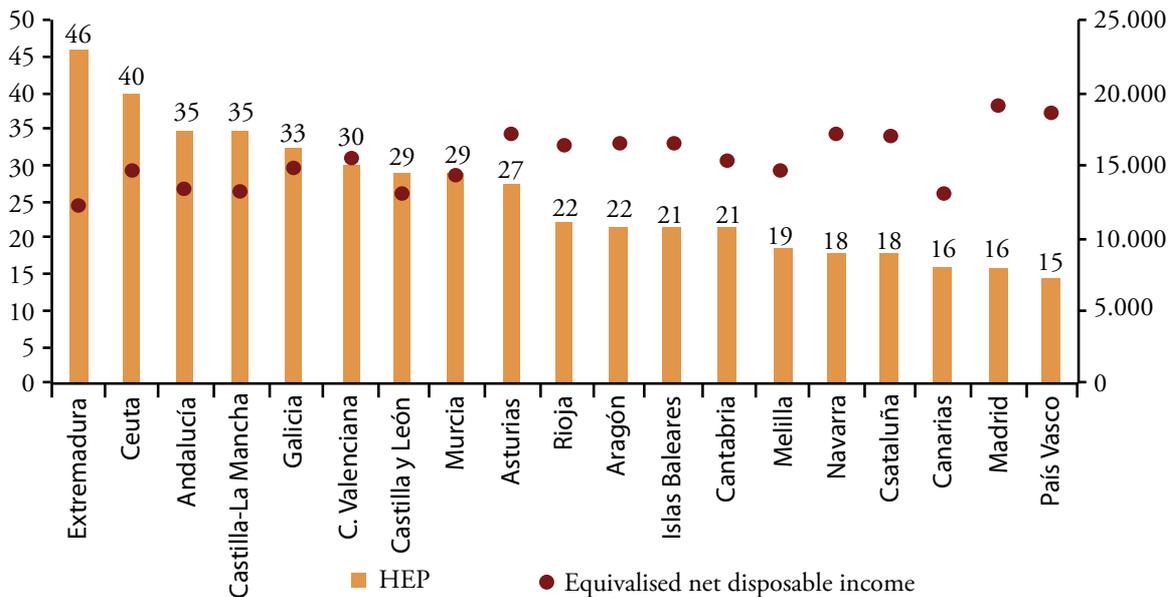
Fuente: Reimpreso de Barrella *et al.* (2022).

no aparecen en el mapa, es decir, Ceuta y Melilla, son, respectivamente, 1.262 y 1.055 euros.

Fijando *RENE/2* como umbral, se estima que, en 2019, el 45 % de los hogares españoles tenía un gasto energético absoluto bajo, pero solo el 56 % de estos últimos (el 25 % del total de unidades familiares, es decir, 4,7 millones de hogares) se encontraba en situación de pobreza energética oculta. La figura 4 muestra los resultados de 2019 del indicador HEP y de la renta neta disponible equivalente, ambos desagregados por CC. AA.

Figura 4

Indicador HEP en 2019 [%] y renta neta disponible equivalente (€/año)



Nota: Equivalencia modificada por la OCDE de la variable IMPEXAC de la EPF 2019 desagregada por CC. AA.

Fuente: Reimpreso de Barrella *et al.* (2022).

De la figura 4, se puede concluir que existe una gran disparidad en los resultados del HEP entre las CC. AA. españolas. Aunque *a priori* los elevados porcentajes de pobreza energética en Ceuta y Andalucía podrían ser aparentemente contradictorios (sus valores de *RENE* no se encuentran definitivamente entre los más altos del país), este resultado puede explicarse por dos cuestiones: son

CC. AA. de bajos ingresos y la mayoría de los hogares que viven en ellas no poseen aparatos de calefacción (respectivamente, el 98 % y el 78 %, según la *EPF*), aunque los necesitarían para lograr el confort. Por otro lado, mirando las figuras 5 y 6, son más evidentes los factores que hacen que Extremadura sea la región con mayor cuota de *HEP*. Como se ha mencionado anteriormente, los hogares que viven en esta región tienen un alto gasto en calefacción y aire acondicionado. Además, tienen por término medio la renta neta disponible más baja del país. Por el contrario, las CC. AA. más ricas, es decir, Madrid y el País Vasco, tienen las cuotas de *HEP* más bajas. En cuanto a los demás análisis desagregados, se analizan seguidamente los resultados obtenidos. La proporción de *HEP* varía de forma bastante significativa con el tamaño del hogar. De hecho, los hogares con más de cuatro miembros son los más afectados, seguidos de los hogares de un solo miembro. En cuanto a la influencia de la antigüedad de la vivienda en la pobreza energética, el valor desagregado de la *HEP* para los edificios construidos “hace menos de 25 años” es del 13,8 %, mientras que el 30,7 % de los hogares que viven en edificios construidos “hace 25 o más años” se encuentran en situación de pobreza energética oculta. Los resultados del *HEP* desglosados según el tipo de tenencia de la vivienda muestran que el 31 % de los inquilinos están afectados por la pobreza energética oculta, frente al 23 % de los propietarios. Por otro lado, teniendo en cuenta el grado de urbanización de la localidad, los hogares que viven en zonas rurales experimentan niveles de *HEP* más altos que los hogares que viven en zonas urbanas (35 % frente al 24 %). Por último, el análisis de la “brecha de pobreza energética” permite estimar la profundidad de la pobreza energética oculta en el país. En 2019, esta brecha era de una media de 374 euros por hogar y el presupuesto para abordarla y potencialmente erradicarla en España era de 1.692 millones de euros (el 0,14 % del PIB español). Si se compara este valor con el presupuesto real destinado a los bonos sociales en 2019 (214 millones de euros), el calculado en este capítulo es casi ocho veces superior al real de 2019.

A la vista de estos resultados, se realizaron tres tipos de análisis de sensibilidad estudiando la influencia de los parámetros principales del umbral absoluto en los resultados del indicador *HEP*:

- *HDD_18 y HDD_16*. Dada la elevada proporción del gasto en climatización en el *RENE* total (61 %), se estimó pertinente analizar el impacto de la modificación

de los parámetros básicos clave de su cálculo. En cuanto al gasto en calefacción (que representa el 56 % del *RENE* de los hogares, evidente también de la comparación de los valores del mapa 1 con los del mapa 2), en el escenario base se calculó utilizando la demanda de referencia del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE] *et al.*, 2015) que aplica 20 °C como temperatura de referencia. Sin embargo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la temperatura de confort necesaria para evitar problemas de salud durante la estación fría es de 18 °C (World Health Organization, 2018). Por lo tanto, el cálculo de la demanda de calefacción necesaria se repitió utilizando 18 °C como temperatura de referencia. Además, algunos estudios (por ejemplo, Collins, 1986) señalan un umbral de temperatura interior aún más bajo para evitar enfermedades respiratorias, es decir, 16 °C. Por lo tanto, la demanda de calefacción se calculó de nuevo asumiendo una temperatura de confort base de 16 °C. Los resultados de estos dos cálculos se aplicaron para estimar dos escenarios *HEP* con menores necesidades de calefacción: *HDD_18* y *HDD_16*.

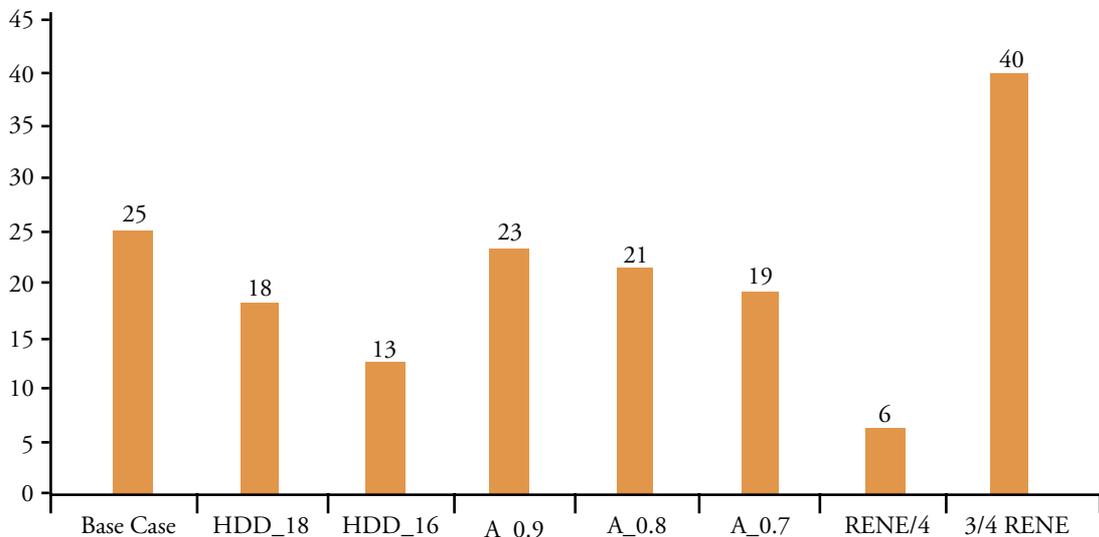
- *A_0,9/0,8/0,7*. El segundo análisis de sensibilidad se realizó suponiendo una disminución de la superficie climatizada (calefacción y refrigeración) por los hogares. Este escenario se considera porque es habitual que los hogares no tengan (o no utilicen) aparatos de climatización en todas las habitaciones de la vivienda. Dada la variabilidad de este parámetro, se asumieron diferentes porcentajes de superficie climatizada (90 %, 80 % y 70 %) para el cálculo. Por lo tanto, estos nuevos valores de demanda se integraron en la estimación de la *HEP*, introduciendo así tres nuevos escenarios de *HEP* (*A_0,9/0,8/0,7*).
- *RENE/4* y *3/4 RENE*. El tercer tipo de análisis de sensibilidad se centró en el porcentaje de *RENE* fijado como umbral absoluto. Por un lado, algunos hogares muy vulnerables tienden a comprimir su consumo energético hasta un punto extremo. Por lo tanto, para detectar esta pobreza energética oculta extrema, se repitió el cálculo del indicador fijando el umbral en *RENE/4* como aproximación al gasto energético mínimo del hogar. Por otro lado, algunos hogares se sitúan fuera pero cerca de la zona de pobreza energética definida por el umbral *RENE/2* o se acercan a dicha zona. Por lo tanto, se consideró un umbral más alto, es decir, *3/4* de *RENE*, como aproximación para identificar los hogares que podrían ser vulnerables a la pobreza energética oculta.

A partir de este estudio, se propone un escenario alternativo “ajustado a la estrategia de confort de los hogares” (en línea con la literatura de otros países, por ejemplo, Portugal (Palma, Gouveia y Simoes, 2019)) como un análisis de sensibilidad adicional: el indicador HEP se estimó de nuevo después de ajustar los parámetros primarios de la demanda de climatización a las características del sector residencial español y a las recomendaciones de la OMS, es decir, 18 °C como temperatura de confort de referencia en invierno (OMS), 75 % de superficie de suelo calentado (Marcos, Izquierdo y Parra, 2011) y 60 % de superficie de suelo refrigerado (Izquierdo *et al.*, 2011). Por último, el indicador *HEP* se evaluó utilizando el umbral energético del caso base y, como umbral de ingresos, el criterio de “riesgo de pobreza” (AROP) de la UE (European Commission, 2018), es decir, el 60 % de la renta media nacional equivalente, que ya se aplicó en varios estudios sobre pobreza energética (por ejemplo, Karpinska y Śmiech, 2020).

Figura 5

Análisis de sensibilidad del indicador HEP en 2019

(Porcentaje)



Nota: HDD_18 – temperatura de confort a 18°C; HDD_16 – temperatura de confort a 16°C; A_0.9/0.8/0.7 – porcentaje reducido de superficie de suelo acondicionado al 90 %, 80 % y 70 %; RENE/4 – pobreza energética oculta extrema; 3/4 RENE – vulnerable a la pobreza energética oculta.

Fuente: Reimpreso de Barrella *et al.* (2022).

La figura 5 muestra los resultados de los tres tipos de análisis de sensibilidad del indicador *HEP* que estudian el impacto de cambiar los parámetros primarios del umbral de gasto energético absoluto.

A partir de los resultados mostrados en la figura 5, se observa que la variación de la temperatura de confort invernal es la que más influye en el valor del indicador de pobreza energética. Además, la variación de la superficie de suelo climatizado también tiene una influencia significativa en los resultados de los indicadores: en particular, la disminución del valor del indicador de A_{90} a A_{70} es prácticamente lineal. El tercer tipo de análisis de sensibilidad al umbral de gasto energético muestra que el 6 % de los hogares se encuentran en “pobreza energética oculta extrema” y el 40 % son “vulnerables a la pobreza energética oculta”. Por último, sólo el 10 % de los hogares españoles podrían considerarse en situación de pobreza energética oculta según el escenario “ajustado a la estrategia de confort de los hogares”. Este resultado implica que el valor *HEP* “ajustado a la estrategia de confort de los hogares” disminuye en un 58 % con respecto al escenario base. En cuanto al análisis de sensibilidad del umbral de renta, el valor del indicador *HEP* calculado utilizando el umbral AROP como criterio de renta (16 %) es muy inferior al obtenido en el caso base (25 %).

4.2. Conclusiones

La aplicación de esta metodología al caso de estudio español muestra algunas conclusiones destacadas:

- La pobreza energética oculta es una dimensión del fenómeno global que no puede pasarse por alto. De hecho, en 2019, el 25 % de los hogares españoles estaban afectados por esta problemática social. Ese mismo año, la “brecha de pobreza energética” media por hogar era de 374 euros y el presupuesto nacional necesario para una posible política de erradicación de la pobreza energética oculta era ocho veces mayor que el presupuesto real destinado a los bonos sociales. Esta situación podría ser aún más grave en la actualidad dada la coyuntura de precios energéticos.
- La región de residencia, el tamaño del hogar y el nivel de ingresos son determinantes para la posibilidad de caer en pobreza energética.

Respectivamente, los hogares que viven en Extremadura, con más de cuatro miembros y que pertenecen al primer decil de ingresos son los más vulnerables a este problema social.

- Además, la antigüedad del edificio influye significativamente en esta cuestión, es decir, los hogares que viven en viviendas antiguas tienen una cuota de *HEP* mayor que los que viven en viviendas de reciente construcción. Por otro lado, los inquilinos, por un lado, y las familias/personas que viven en zonas rurales, por el otro, también son especialmente vulnerables a la pobreza energética oculta.
- El indicador *HEP* en el escenario “ajustado a la estrategia de confort de los hogares” detecta una proporción significativamente menor de familias en situación de pobreza energética oculta, señalando así la conveniencia (para la sociedad) de entablar un debate sociopolítico sobre lo que debe considerarse como necesidades energéticas básicas y necesarias. Por último, un escenario de sensibilidad a los ingresos basado en el umbral de “riesgo de pobreza” de la UE muestra que el criterio de ingresos seleccionado para eliminar los falsos positivos es también un determinante clave de la proporción de hogares identificados como afectados por la pobreza energética oculta.

5. ESTUDIO DE VIABILIDAD TECNOECONÓMICA DE LAS BOMBAS DE CALOR AIRE-AGUA CENTRALIZADAS PARA HACER FRENTE A LA POBREZA ENERGÉTICA EN ESPAÑA

5.1. Metodología y resultados

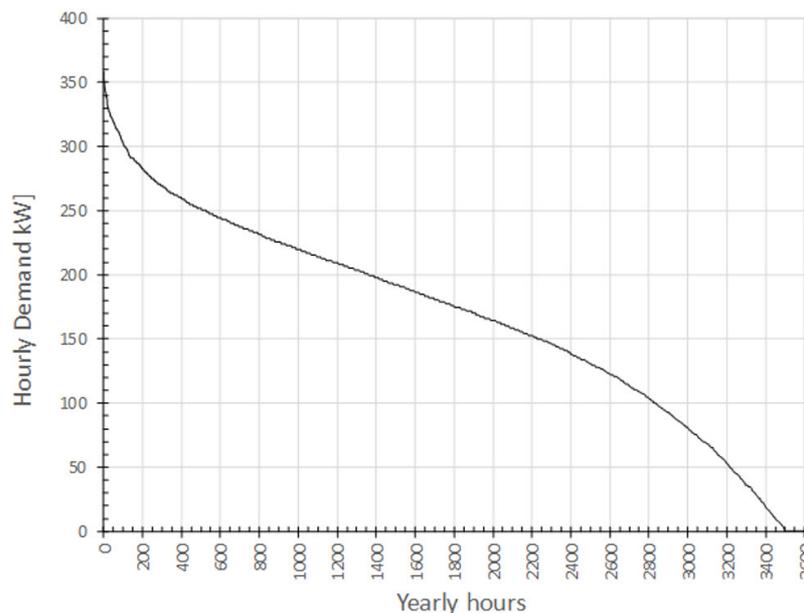
En el quinto capítulo de la tesis se estudia la viabilidad tecnoeconómica de las bombas de calor aire-agua centralizadas accionadas por electricidad (EHP) y por motor de gas (GHP) para considerarlas eventualmente como soluciones alternativas para los hogares vulnerables que viven en viviendas en bloque. La novedad de este análisis radica tanto en el estudio del uso de las bombas de calor aire-agua centralizadas para satisfacer la demanda de calefacción en un sector y un país donde no están comúnmente instaladas, es decir, el sector residencial

español, como en su evaluación como medidas de lucha contra la pobreza energética. En este sentido, las dos tecnologías estudiadas se han abordado como una rehabilitación del sistema de calefacción actual basado en radiadores, por lo que las temperaturas de funcionamiento de las bombas de calor se adaptan a esta configuración.

En cuanto a la demanda horaria de calefacción requerida, se aplica una versión avanzada del modelo presentado en estudios anteriores (Uris, Linares y Arenas, 2015), que considera también el nivel de aislamiento térmico del edificio. La demanda horaria específica de referencia en invierno se calcula mediante una modificación propia del procedimiento regulado del CTE (Ministerio de Fomento, 2009), que estima el valor de este parámetro en función de la severidad climática de invierno (dependiente de la radiación y de los grados día de calefacción) y el tipo de vivienda. Una vez obtenida la demanda horaria específica de referencia, se

Figura 6

Perfil monótono de la demanda anual acumulada de calefacción para un conjunto de viviendas en bloque en Madrid construidas entre 1981 y 2007 con 6.000 m² de superficie total calentada



Fuente: Reimpreso de Barrella *et al.* (2020).

corrige en función del índice de eficiencia energética (*EEP*) y de la relación entre la demanda de referencia del conjunto de edificios de referencia y el percentil 10 de este conjunto (*R*) (Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla [AICIA] e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2011). Finalmente, la demanda horaria se ordena de mayor a menor, obteniendo el perfil monótono de demanda de calefacción acumulada anual, como se muestra en la figura 6.

A continuación, se proponen dos modelos para obtener las prestaciones de la *EHP*: uno para el punto de máxima eficiencia y otro para el funcionamiento fuera de diseño. El primero se utiliza para dimensionar los componentes principales y el segundo para obtener el mapa de operación. La bomba de calor analizada utiliza el aire como fuente térmica. Por lo tanto, se supone un control de la velocidad de rotación (inverter) que acciona el motor del compresor para evitar la pérdida de capacidad de calentamiento cuando la temperatura ambiente disminuye. Fuera de sus límites, es necesario un sistema de apoyo, que se supone es una caldera de condensación con modulación, alimentada por gas natural. Para mejorar aún más la eficiencia de la bomba de calor, la velocidad de rotación del ventilador del evaporador también se controla para mantener constante la caída de temperatura en el aire. Los principales parámetros de operación de la bomba de calor en su punto nominal (*BEP*, en su sigla inglesa) son la potencia calorífica (calor útil liberado en el condensador), el consumo del compresor y el Coeficiente de rendimiento (*COP*, en su sigla inglesa). Esta última variable se calcula como cociente entre las primeras dos. En el punto de diseño, todos ellos son valores instantáneos; posteriormente, en la operación fuera de diseño, se redefinen en sentido estacional, y los índices de potencia y el *COP* instantáneo se integran en el tiempo.

Por otro lado, para el estudio de la *GHP* se consideran dos equipos diferentes, con una potencia calorífica de diseño de, respectivamente, 75 kWt y 25 kWt. Se utilizan estos dos modelos por estar comercialmente disponibles (véase (Izaguirre De Benito, 2021)). La combinación de estos dos modelos permite utilizar las bombas de calor de mayor potencia para cubrir la mayor parte de la demanda, ya que tienen mejores eficiencias, mientras que la bomba de 25 kWt se utiliza para cubrir el pico de la demanda, ya que permite optimizar el grado de carga

de las bombas en funcionamiento. A partir de las prestaciones de las máquinas en diferentes condiciones de funcionamiento (Izaguirre De Benito, 2021), se realiza una regresión lineal para entender cómo afectan las distintas variables al rendimiento de la bomba de calor.

Una vez determinada la demanda horaria de calefacción y la operación de la *EHP*, se puede obtener el mapa de rendimiento del dispositivo acoplado a la demanda. El caso base es un bloque de viviendas con una superficie global calefactada de 6.000 m² y un EEP de 2,18, es decir, construidas entre 1981 y 2007, situadas en Madrid (zona D). Los índices de rendimiento resultantes del cálculo en el caso base se muestran en el cuadro 1. Además, la bomba de calor cubre la gran mayoría de la demanda de calefacción (96 %) y el resto queda cubierto por la caldera de apoyo (4 %).

Cuadro 1

Índices de rendimiento del *EHP* en el caso base

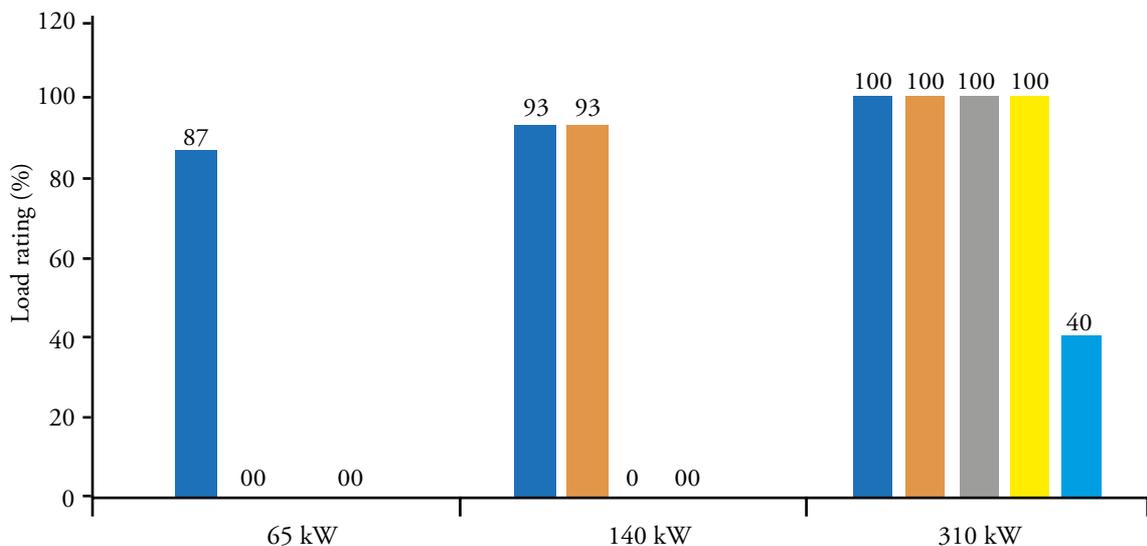
Parametro	Valor
Factor de Operación de Calefacción Estacional, HSPF [-]	2,585
Emisión de CO ₂ evitada, AVCO ₂ [g CO ₂ /kWh]	131,7
Ratio entre energías renovables y demanda de calefacción, R2H [%]	74,22

La figura 7 muestra una representación de la estrategia para el arranque de las *GHP* y la carga a la que trabajan. Como puede verse en esta figura, siempre será prioritario tener el mayor número de bombas de 75 kWt con la mayor carga posible, aunque el rendimiento de la bomba de 25 kWt se vea penalizado. Esto se debe a que las bombas de 75 kWt tienen un mayor rendimiento que la de 25 kWt.

Además, se realiza un análisis económico mediante el método del coste normalizado de calefacción (*LCOH*), que permite comparar las bombas de calor estudiadas entre sí y con tecnologías convencionales como las calderas individuales y centralizadas de gas natural. Este método considera tanto el coste inversión de la tecnología empleada (*CAPEX*) cómo los costes operativos y de mantenimiento (*OPEX*). En cuanto al primer coste, se utilizan referencias de catálogo (aplicando economía de escala en las *GHP*), mientras que los costes de operación se basan en

Figura 7

Gráfico explicativo de la estrategia para el arranque de las GHP



Nota: Azul oscuro: 1ª GHP de 75 kW; Naranja: 2ª GHP de 75 kW; Gris: 3ª GHP de 75 kW; Amarillo: 4ª GHP de 75 kW; Azul claro: GHP de 25 kW.

Fuente: Reimpreso de Barrella (2022).

tarifas del mercado libre. Los resultados del *LCOH* para las bombas de calor y las tecnologías convencionales (calderas de condensación individual y centralizada de gas natural) se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2

Costes normalizados en el caso base para EHP, GHP y calderas individual y centralizada

Costes normalizados	EHP	GHP	Caldera individual	Caldera centralizada
Coste normalizado de calefacción (basado en la demanda), LCOHDB [€/MWh]	92,22	107,78	108,55	73,54
Coste normalizado de calefacción (basado en la superficie), LCOHAB [€/m²]	9,23	N/A	10,87	7,36

En cuanto al análisis de costes de la *EHP* en el caso de referencia, la tecnología propuesta (bomba de calor más caldera de apoyo) reduce el coste normalizado de la calefacción en un 15 % con respecto a la caldera de gas natural individual. Sin embargo, el sistema propuesto tiene un *LCOH* un 25 % superior al de una caldera de gas natural centralizada. Por otra parte, con esta última tecnología no se emplean energías renovables ni se evitan las emisiones de dióxido de carbono. La contribución más importante al coste global de la *EHP* es el coste de la energía, lo que sugiere la necesidad de adoptar medidas para reducir la factura eléctrica. Por el otro lado, el *LCOH* [€/MWh] de las GPS en el caso base es de 107,78 €/MWh, que es superior al de la *EHP* y al de la caldera centralizada de gas natural, pero es ligeramente inferior al de la caldera individual, es decir, sería económicamente competitiva con esta última tecnología, pero no con las soluciones centralizadas estudiadas.

Además, se ha realizado un análisis paramétrico de las *EHP* en cinco grandes ciudades de España pertenecientes a diferentes zonas climáticas. Los resultados muestran que las prestaciones de esta tecnología varían ampliamente en función de la zona climática considerada. Además, a medida que la eficiencia energética del edificio es mejor, la superficie de suelo calentado es mayor, el rendimiento técnico y los parámetros ambientales permanecen constantes (por tanto, son independientes del aislamiento térmico), pero el *LCOH* por unidad de superficie disminuye, es decir, el sistema es más viable económicamente. En cuanto al análisis paramétrico sobre las *GHP*, muestra que a medida que aumenta el número de dispositivos, la demanda de calefacción cubierta también aumenta y el *LCOH* disminuye. Además, un segundo análisis paramétrico muestra que es más rentable económicamente instalar una *GHP* en un clima más frío.

5.2. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de la tesis, las *EHP* y *GHP* centralizadas de aire-agua pueden considerarse como sistemas prometedores para abordar la pobreza energética en los hogares españoles vulnerables que viven en viviendas en bloque. No obstante, hay que señalar varias advertencias:

- En cuanto a los indicadores ambientales y técnicos, los resultados muestran un excelente rendimiento de las *EHP* en comparación con soluciones clásicas como las calderas de condensación individuales y centralizadas alimentadas por gas natural. Por otro lado, la solución de las *GHP* tiene un peor rendimiento estacional, pero ofrece una mejor respuesta a las bajas temperaturas. No obstante, cabe destacar que el rendimiento de las *GHP* se calcula en función de la energía primaria (gas natural), mientras que el de las *EHP* se estima en función de la energía final (electricidad).
- Ambas tecnologías son más competitivas económicamente que una caldera de gas natural individual. Sin embargo, sería muy recomendable tomar medidas para reducir la factura eléctrica en el caso de las *EHP* centralizadas para amortiguar sus costes de operación, basándose en criterios medioambientales, y hacerlas competitivas también frente a las soluciones de calderas de gas natural centralizadas. Por otro lado, se ha detectado una menor madurez tecnológica en las *GHP*, tanto en términos de tamaños disponibles como de refrigerantes, lo que afecta a la viabilidad tecnoeconómica de este sistema térmico.
- El análisis paramétrico muestra que los indicadores de funcionamiento de las *EHP* varían ampliamente en función de la zona climática considerada. Además, la superficie calefactada y el *LCOH* por unidad de superficie dependen de la eficiencia energética del edificio. Por otra parte, para un mismo nivel de aislamiento del edificio, a medida que aumenta la superficie calefactada, el sistema es más viable desde el punto de vista técnico y económico, pero presenta unas peores prestaciones medioambientales.
- En cuanto al análisis paramétrico de las *GHP*, muestra que a medida que aumenta el número de aparatos, la demanda de calefacción cubierta también aumenta y el *LCOH* disminuye. Además, un segundo análisis paramétrico muestra que, en el escenario de precios energéticos de referencia, es más viable económicamente instalar una *GHP* en un clima más frío.

6. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LAS PRINCIPALES POLÍTICAS CONTRA LA POBREZA ENERGÉTICA INVERNAL EN ESPAÑA

6.1. Metodología y resultados

La tesis incluye (en el sexto capítulo) una evaluación de la efectividad de algunas de las principales políticas paliativas y estructurales implementadas en España para combatir la pobreza energética y propone ayudas alternativas que mejorarían la lucha contra esta problemática social en España. Este análisis se realiza usando el modelo *RTEE* (véase sección III) para una evaluación socioeconómica de estos dos tipos de políticas.

En primer lugar, el trabajo presenta un análisis del impacto de la pobreza energética invernal (*WEP*, en su acrónimo en inglés) del actual bono social térmico español y propone una ayuda alternativa, el Cheque Térmico (*TEC*, en su acrónimo en inglés), que es una ayuda para consumidores vulnerables cuyo importe depende de las “necesidades energéticas invernales” del hogar (*RWTEE*) y de su grado de vulnerabilidad. Para evaluar la eficacia de esta ayuda alternativa, se han analizado dos escenarios diferentes para 2019 con el fin de considerar los posibles cambios fiscales que podrían aplicarse en el futuro. El escenario *AT* (*RWTEE* después de impuestos) es un estado *business as usual* que representa la aplicación del *TEC* en la situación española actual. El escenario *BT* (*RWTEE* antes de impuestos) es una situación alternativa en la que no se aplican impuestos a las facturas de energía de los hogares vulnerables. La diferencia financiera entre los dos escenarios (87,5 millones de euros aproximadamente) corresponde a la cantidad de dinero relacionada con la fiscalidad de la energía, que podría cambiar en caso de una nueva política de IVA para los consumidores vulnerables o de cambios en la fiscalidad de los combustibles. De hecho, el Gobierno ha aplicado una disminución temporal del IVA en las facturas de electricidad en 2021 (junto con otras medidas de mitigación de precios, véase la sección 2.4.5.1) para aliviar el impacto negativo de la crisis de los precios de la energía. Por lo tanto, se ha realizado un análisis comparativo del impacto del bono térmico actual y la *TEC* en la asequibilidad de los servicios y la pobreza energética invernal utilizando los

datos de los consumidores vulnerables de los dos años seleccionados, es decir, 2019 y 2021. El análisis realizado en este capítulo señala que el valor medio del bono térmico en 2019 (70 euros) era el 20 % del *TEC* medio en el escenario *AT* (347 euros) y cubría sólo el 6,6 % del *RWTEE* del hogar medio. En cambio, el *TEC* propuesto cubriría, por término medio, el 33 % de los gastos teóricos de calefacción y *ACS* de los hogares. El escenario *BT* permite analizar la política de *TEC* propuesta en todas las zonas climáticas de invierno españolas, ya que elimina la distorsión introducida por la diferente fiscalidad aplicada en algunas provincias. Este análisis señala que el *TEC* en la zona climática más fría (E) sería seis veces mayor que en la zona climática más suave (α). En cuanto al impacto social, el bono térmico de 2019 mitigó la pobreza energética invernal (*WEP*) en España sólo en un 1 %. Por otro lado, el cheque alternativo propuesto lograría una reducción de los hogares con *WEP* del 11 %. Además, este capítulo presenta un análisis adicional sobre la estimación del presupuesto nacional anual del *TEC* de 2019 que sería necesario para cumplir los objetivos del SNSEP y la erradicación ideal de la PME. Por otro lado, la evaluación de la *WEP* realizada para 2021 muestra que, a pesar de las medidas de mitigación de precios aplicadas por el gobierno, la pobreza energética aumentó (escenario “Antes de la ayuda”). La buena noticia es que el escenario que considera también el aumento del presupuesto para el bono térmico muestra que las políticas del gobierno al menos aliviaron los efectos de la crisis de los precios de la energía.

Hay que destacar que el *TEC* se propone como una política que mitiga los problemas financieros relacionados con las facturas energéticas de los hogares vulnerables a corto plazo. Sin embargo, es una medida costosa y no aborda otras causas constitutivas de la pobreza energética, como la baja eficiencia energética de las viviendas, lo que la excluye como medida a medio-largo plazo.

En cuanto a la causa mencionada de la pobreza energética, el cuarto capítulo de la tesis (véase sección IV) muestra que los hogares pobres energéticos suelen vivir en casas poco eficientes energéticamente y con sistemas de calefacción antiguos o inexistentes, lo que dificulta la consecución del confort ambiental interior. Se trata de una cuestión tanto social como medioambiental porque, por un lado, los hogares vulnerables no pueden permitirse pagar facturas energéticas elevadas pero, por otro lado, (sólo) subvencionar su consumo podría conducir a un aumento

de la huella de carbono del sector residencial o de la energía primaria total. Por ello, en el sexto capítulo de la tesis se calcula también el RTEE medio nacional bajo diferentes estrategias de rehabilitación de viviendas aplicadas en 2030 para comparar su impacto en el gasto de energía térmica de los hogares vulnerables y en la *WEP*. Todos los escenarios estudiados pueden resumirse como sigue:

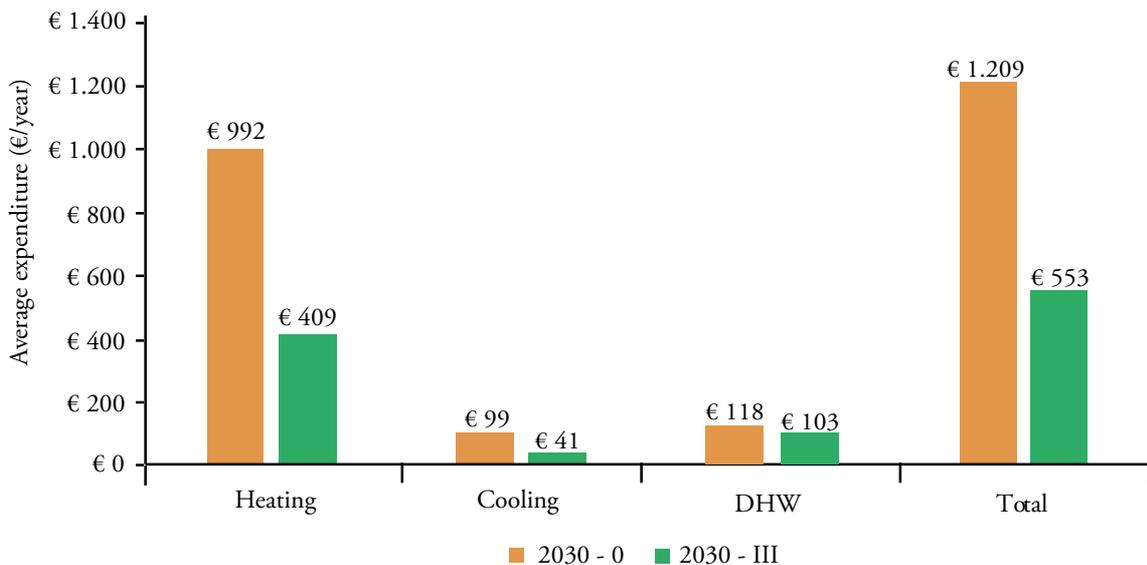
- Escenario de referencia.
- Escenarios futuros proyectados (2030):
 - Escenario 0 – “Sin cambios”: No se aplican medidas de rehabilitación de la envolvente térmica del edificio ni de sustitución de los sistemas térmicos.
 - Escenario I – “Rehabilitación exprés de edificios de bajo coste”: se lleva a cabo un conjunto de medidas de rehabilitación de la envolvente térmica de bajo coste (elaboración propia a partir de (de *Luxán García De Diego et al.*, 2017)) en consumidores vulnerables que viven en viviendas construidas antes de 1981.
 - Escenario II - “Sustitución de sistemas térmicos”: Los sistemas térmicos existentes se sustituyen por los sistemas equivalentes más eficientes (mismo vector energético y tipo de sistema) en 2030 (elaboración propia a partir de (Villamor Sánchez, 2020)):
 - a. Sistemas de calefacción
 - b. Sistemas de refrigeración
 - c. Sistemas de calefacción, refrigeración y ACS
 - Escenario III - “Medidas de rehabilitación energética múltiple” (I+IIc): Todas las medidas mencionadas en los escenarios I y IIc se aplican en las viviendas de los consumidores vulnerables.

La rehabilitación exprés de edificios consigue la mayor reducción de la *RTEE*, es decir, reduce la carga energética térmica media de los hogares en un 25 %, siendo los gastos de calefacción y refrigeración los afectados por esta medida. Por otro

lado, para tener un impacto significativo en la RTEE, se recomienda sustituir todos los sistemas térmicos por otros nuevos (Escenario IIc), consiguiendo así una reducción del gasto del 10 %. Por último, la figura 8 muestra el impacto conjunto de la rehabilitación de edificios de bajo coste y la sustitución de los sistemas térmicos, es decir, el Escenario III comparado con el Escenario de Referencia. Es evidente que la combinación de ambos tipos de medidas de rehabilitación podría tener la mayor eficacia, es decir, podría reducir los gastos necesarios de calefacción y refrigeración en un 49 % y un 59 %, respectivamente.

Figura 8

Gasto requerido medio necesario de los servicios térmicos en el Escenario III comparado con el Escenario 0

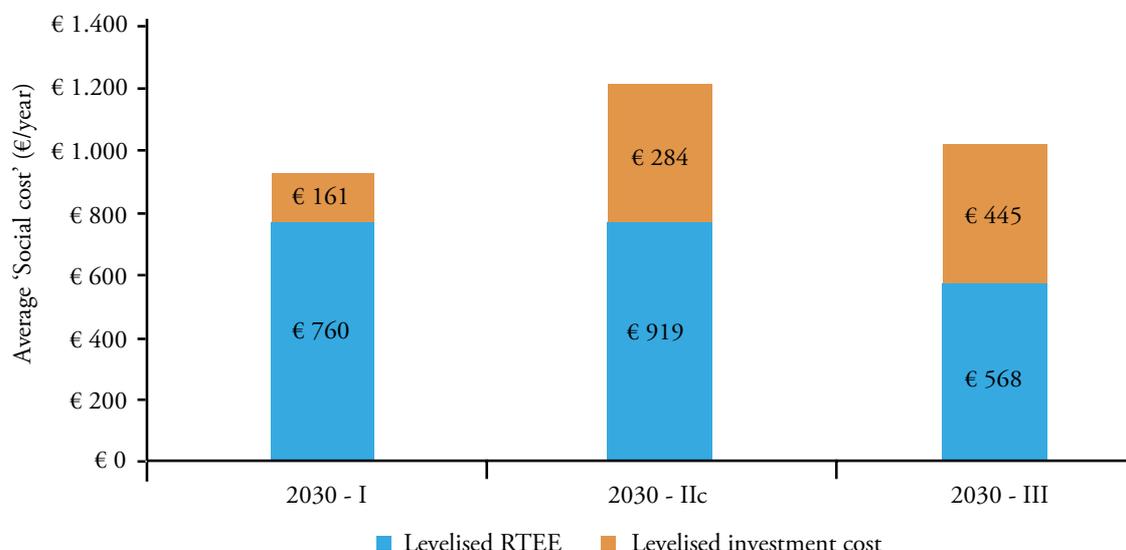


Fuente: Reimpreso de Barrella (2022).

Por otro lado, una idea común a todos los escenarios analizados es que el aumento de los precios de los combustibles fósiles previsto para 2030 aumentará el gasto en calefacción y refrigeración si no se toma ninguna medida (escenario 2030-0). Además, podría afectar al impacto de las estrategias de rehabilitación energética incluidas en el análisis. En particular, podría reducir significativamente o anular el efecto positivo de la sustitución de los sistemas de calefacción o ACS, respectivamente.

Figura 9

“Coste social” (*RTEE* normalizado + *CAPEX*) por hogar medio de los principales escenarios de 2030



Fuente: Reimpreso de Barrella (2022).

Por último, la figura 9 muestra el “coste social” (*RTEE* normalizado + *CAPEX*) por hogar de los principales escenarios de rehabilitación para 2030. Esta comparación económica muestra que el escenario de “rehabilitación exprés de edificios de bajo coste” (2030-I) es el más rentable desde el punto de vista social de los analizados, seguido de cerca por el escenario de “múltiples medidas de rehabilitación energética” (2030-III). Este resultado puede explicarse en parte por la mayor reducción del *RTEE* producido por la rehabilitación de edificios de bajo coste en comparación con la sustitución de los sistemas térmicos. La combinación de los dos tipos de medidas (2030-III) tendría un impacto aún mayor en el *RTEE* (véase la figura 9). Sin embargo, el coste de inversión (*CAPEX*) de la sustitución de los sistemas térmicos por hogar medio (284 euros) es significativamente mayor que el de la rehabilitación de edificios de bajo coste (161 euros), lo que determina un “coste social” mayor en el Escenario III (1.012 euros) que en el Escenario I (921 euros). Esto se debe, principalmente, a los diferentes valores de vida útil de cada inversión: 30 años para la rehabilitación exprés y entre 10 y 18 para los equipos térmicos.

El cuadro 3 compara los resultados obtenidos en la sección 6.3.1 y en la sección 6.3.2 en cuanto a la reducción de la WEP (con respecto al nivel de 2019) que se conseguiría aplicando los derechos de calefacción analizados o las intervenciones de rehabilitación energética propuestas.

Cuadro 3

Variación de la WEP conseguida por los subsidios de calefacción analizados o las intervenciones de rehabilitación energética en los diferentes escenarios con respecto al nivel de 2019

Escenario	Consumidores vulnerables	Consumidores vulnerables severos	Consumidores en riesgo de exclusión social	Total	Variación del WEP
2019	92	98	100	96	0
2019 TSA	90	98	100	95	-1
2019 TEC	73	93	0	86	-11
2030 I	50	90	99	77	-20
2030 IIc	67	94	99	85	-12
2030 IIc	23	80	87	61	-37

Nota: TSA – acrónimo en inglés del bono social térmico; TEC – acrónimo en inglés del cheque térmico.

En el cuadro 3, la aplicación de las medidas estructurales se condensa en tres escenarios principales para 2030, con los que se conseguiría una reducción de la WEP de entre el 12 % y el 37 % respecto al nivel de 2019. La reducción de la WEP producida por las medidas de mitigación como el bono térmico y el TEC es inferior a la que podría lograrse con la aplicación de las medidas mencionadas. Por otra parte, los costes de inversión nacionalizados (CAPEX) para aplicar las medidas de mitigación de los escenarios I, IIc y III de 2030 son, respectivamente, de 172,4 millones de euros, 287,5 millones de euros y 459,9 millones de euros. Esta última cantidad, que se refiere al escenario más efectivo en cuanto a la reducción de la WEP, es sólo un 23 % superior al presupuesto anual que habría que destinar a la aplicación del TEC.

6.2. Conclusiones

Los resultados del sexto capítulo de la tesis permiten delinear algunas conclusiones y recomendaciones políticas, que pueden resumirse como sigue:

- La aplicación de las medidas estructurales analizadas lograría una reducción de la *WEP* en 2030 de entre el 12 % y el 37 % respecto a la cuota de 2019, lo que supone un impacto mayor comparado con el producido por las ayudas a la calefacción, como el actual bono térmico y la propuesta de *TEC*. De hecho, se estima que estas últimas políticas reducen la *WEP* en un 1 % y un 11 %, respectivamente.
- En lo que respecta a la viabilidad económica, el coste de inversión anualizado (*CAPEX*) para aplicar el escenario de medidas estructurales más eficaces en cuanto a la reducción de la *WEP* y al coste social (entre los analizados, es decir, un escenario con la rehabilitación exprés de la envolvente edificatoria y la sustitución de los sistemas térmicos) es un 23 % inferior al presupuesto necesario para aplicar el *TEC* en un solo año.
- No obstante, los subsidios de calefacción son instrumentos necesarios para reducir la factura energética de las personas vulnerables a corto plazo. Por otro lado, estas políticas paliativas deben ser soluciones temporales complementadas por medidas estructurales a medio y largo plazo. A la larga, esta estrategia política progresiva podría evitar la cronificación de la pobreza energética al mejorar la eficiencia energética de los hogares vulnerables a un coste social asequible.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En general, la tesis presentada en este artículo pretende contribuir a mejorar la identificación, medición y el abordaje de la pobreza energética en España y en la UE. Confío en que las conclusiones expuestas y las recomendaciones políticas sean útiles para los agentes involucrados a nivel nacional y europeo para diseñar e implementar políticas y estrategias de manera integrada. El recorrido científico que se ha condensado en la tesis me ha permitido crecer tanto desde el punto de vista personal como profesional y aportar mi granito de arena a la lucha contra esta cara de la pobreza relacionada con la energía. De hecho, abordar la problemática de la energía y la pobreza ha sido una de mis principales preocupaciones durante los últimos catorce años y creo que esta tesis es tanto la conclusión de un proceso

como el inicio de una línea de trabajo que aún tiene mucho que aportar a la sociedad.

En relación con los trabajos futuros, se han previsto varias mejoras para potenciar el modelo *RENE* y sus aplicaciones directas. Otros trabajos podrían analizar las cuestiones inexploradas de las aplicaciones indirectas del modelo *RENE* y las otras contribuciones de la tesis, es decir el análisis y propuesta de indicadores y la evaluación de soluciones técnicas y políticas viables. Adicionalmente, durante el periodo de intercambio de la tesis doctoral en la Escuela de Ciencia y Tecnología NOVA de Lisboa (Portugal) se inició un trabajo con el objetivo de explorar un posible marco común para abordar la pobreza energética en la Península Ibérica.

REFERENCIAS

ABUHEIBA, A., MAHDEREKAL, I., MOMEN, A. y VINEYARD, E. (2017). Challenges and opportunities of Gas Engine Heat Pumps-Two Case Studies. In *12th IEA Heat Pump Conference 2017*.

ANDERSON, W., WHITE, V. y FINNEY, A. (2012). Coping with low incomes and cold homes. *Energy Policy*, 49, pp. 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.002>

ANTEPARA, I., PAPADA, L., GOUVEIA, J. P., KATSOUKAKOS, N. y KALIAMPAKOS, D. (2020). Improving Energy Poverty Measurement in Southern European Regions through Equivalization of Modeled Energy Costs. *Sustainability*, 12, 5721. <https://doi.org/10.3390/su12145721>

BAGNOLI, L. y BERTOMÉU-SÁNCHEZ, S. (2022). How effective has the electricity social rate been in reducing energy poverty in Spain? *Energy Econ.*, 105792. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2021.105792>

BARRELLA, R. (2022). *Addressing energy poverty in an integrated way. An interdisciplinary characterisation of Spanish vulnerable households and proposal for implementing feasible technical and policy solutions*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.

BARRELLA, R., LINARES, J. I., ROMERO, J. C., ARENAS, E. y CENTENO, E. (2021). Does cash money solve energy poverty? Assessing the impact of household heating allowances in Spain. *Energy Res. Soc. Sci.*, 80, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102216>

BARRELLA, R., PRIEGO, I., LINARES, J. I., ARENAS, E., ROMERO, J. C. y CENTENO, E. (2020). Feasibility Study of a Centralised Electrically Driven Air Source Heat Pump Water Heater to Face Energy Poverty in Block Dwellings in Madrid (Spain). *Energies*, 13, 2723. <https://doi.org/10.3390/en13112723>

BARRELLA, R., ROMERO, J. C., LINARES, J. I., ARENAS, E., ASÍN, M. y CENTENO, E. (2022). The dark side of energy poverty: Who is underconsuming in Spain and why? *Energy Res. Soc. Sci.*, 86, 102428. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102428>

BOUZAROVSKI, S., BURBIDGE, M. y STOJILOVSKA, A. (2020). *Deliverable 2.1a Report on Energy Poverty in the PRS-Overview & Framework. Version 2020/3*. United Kingdom: University of Manchester.

BROUNEN, D., KOK, N. y QUIGLEY, J. M. (2012). Residential energy use and conservation: Economics and demographics. *Eur. Econ. Rev.*, 56, pp. 931–945. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2012.02.007>

BRUNNER, K. M., SPITZER, M. y CHRISTANELL, A. (2012). Experiencing fuel poverty. Coping strategies of low-income households in Vienna/Austria. *Energy Policy*, 49, pp. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.076>

CHARLIER, D. y LEGENDRE, B. (2021). Fuel poverty in industrialized countries: Definition, measures and policy implications a review. *Energy*, 236, 121557. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121557>

COLLINS, K. J. (1986). Low indoor temperatures and morbidity in the elderly. *Age Ageing*, 15, pp. 212–220. <https://doi.org/10.1093/ageing/15.4.212>

DE LUXÁN GARCÍA DE DIEGO, M., SÁNCHEZ-GUEVARA SÁNCHEZ, C., ROMÁN LÓPEZ, E., DEL MAR BARBERO BARRERA, M. y GÓMEZ MUÑOZ, G. (2017). *Rehabilitación exprés para hogares vulnerables. Soluciones de bajo coste*.

Abordando la pobreza energética de manera integrada. Una caracterización interdisciplinar de los hogares...

DOBBINS, A., FUSO NERINI, F., DEANE, P. y PYE, S. (2019). Strengthening the EU response to energy poverty. *Nat. Energy*, 4, pp. 2–5. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0316-8>

EU ENERGY POVERTY OBSERVATORY. (2020). Indicators & Data [WWW Document]. <https://www.energy-poverty.eu/indicators-data> (accessed 5.29.20).

EUROPEAN COMMISSION. (2018). EU social indicators dataset – Employment, Social Affairs & Inclusion - European Commission [WWW Document]. <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=818&langId=en&id=8> (accessed 9.8.21).

GARCÍA ALVAREZ, G. y TOL, R. S. J. (2020). The Impact of the Bono Social de Electricidad on Energy Poverty in Spain (No. 04–2020). Brighton.

GRUPO DE TERMOTECNIA DE LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE SEVILLA (AICIA), INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). (2011). Escala de calificación energética para edificios existentes, Calificación de Eficiencia Energética de Edificios. Madrid.

HENDERSON, J. y HART, J. (2013). *BREDEM 2012-A technical description of the BRE Domestic Energy Model*.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). (2019). SPAHOUSEC II: Análisis estadístico del consumo de gas natural en las viviendas principales con calefacción individual. Madrid.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA (IETCC-CSIC), ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y COOPERACIÓN INDUSTRIAL DE ANDALUCÍA (AICIA). (2015). Calificación de la eficiencia energética de los edificios.

IZAGUIRRE DE BENITO, Á. (2021). *Análisis de viabilidad técnico-económica de la bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural para viviendas en bloque como medida activa contra la pobreza energética*. Universidad Pontificia Comillas.

IZQUIERDO, M., MORENO-RODRÍGUEZ, A., GONZÁLEZ-GIL, A. y GARCÍA-HERNANDO, N. (2011). Air conditioning in the region of Madrid, Spain: An approach to electricity consumption, economics and CO₂ emissions. *Energy*, 36, pp. 1630–1639. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2010.12.068>

KARPINSKA, L. y ŚMIECH, S. (2020). Invisible energy poverty? Analysing housing costs in Central and Eastern Europe. *Energy Res. Soc. Sci.*, 70, 101670. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101670>

LAMPIETTI, J. A. y MEYER, A. S. (2002). *Coping with the cold: heating strategies for Eastern Europe and Central Asia's urban poor*. Washington D.C.: World Bank. <https://doi.org/10.1596/0-8213-5328-4>

MARCOS, J. D., IZQUIERDO, M. y PARRA, D. (2011). Solar space heating and cooling for Spanish housing: Potential energy savings and emissions reduction. *Sol. Energy*, 85, pp. 2622–2641. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2011.08.006>

MEYER, S., LAURENCE, H., BART, D., LUCIE, M. y KEVIN, M. (2018). Capturing the multifaceted nature of energy poverty: Lessons from Belgium. *Energy Res. Soc. Sci.*, 40, pp. 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.017>

MINISTERIO DE FOMENTO. (2009). Documento Básico HE. Ahorro de energía.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2019). Documento Básico HE. Ahorro de energía.

MINISTERIO DE TRANSPORTE MOVILIDAD Y AGENDA URBANA. (2020). ERESEE 2020. Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). (2020). Informe sintético de indicadores de eficiencia energética en España. Año 2018. 4a Edición. Julio 2020.

NEIROTTI, F., NOUSSAN, M. y SIMONETTI, M. (2020). Towards the electrification of buildings heating – Real heat pumps electricity mixes based on high

resolution operational profiles. *Energy*, 195, 116974. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116974>

PALMA, P., GOUVEIA, J. P. y SIMOES, S. G. (2019). Mapping the energy performance gap of dwelling stock at high-resolution scale: Implications for thermal comfort in Portuguese households. *Energy Build.*, 190, pp. 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.002>

ROMERO, J. C., LINARES, P., LÓPEZ, X., LABANDEIRA, X. y PÉREZ, A. (2015). *Pobreza Energética en España. Análisis económico y propuestas de actuación*. Vigo.

SCARPELLINI, S., ALEXIA SANZ HERNÁNDEZ, M., MONEVA, J. M., PORTILLO-TARRAGONA, P. y RODRÍGUEZ, M. E. L. (2019). Measurement of spatial socioeconomic impact of energy poverty. *Energy Policy*, 124, pp. 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.011>

STOJILOVSKA, A., YOON, H. y ROBERT, C. (2021). Out of the margins, into the light: Exploring energy poverty and household coping strategies in Austria, North Macedonia, France, and Spain. *Energy Res. Soc. Sci.*, 82, 102279. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102279>

THE CARBON TRUST AND RAWLINGS SUPPORT SERVICES. (2016). Evidence Gathering-Low Carbon Heating Technologies. Gas driven heat pumps.

TIRADO HERRERO., S., JIMÉNEZ MENESES, L., LÓPEZ FERNÁNDEZ, J. L. e IRIGOYEN HIDALGO, V. M. (2018). *Pobreza energética en España 2018. Hacia un sistema de indicadores y una estrategia de actuaciones estatales*. Madrid.

URIS, M., LINARES, J. I. y ARENAS, E. (2015). Size optimization of a biomass-fired cogeneration plant CHP/CCHP (Combined heat and power/Combined heat, cooling and power) based on Organic Rankine Cycle for a district network in Spain. *Energy*, 88, 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.054>

VILLAMOR SÁNCHEZ, P. (2020). *Estudio base para el análisis del impacto en la población vulnerable a la pobreza energética de diferentes escenarios de demanda térmica en el sector residencial a 2030 y 2050*. Comillas Pontifical University.

WOLFF, A., WEBER, I., GILL, B., SCHUBERT, J. y SCHNEIDER, M. (2017). Tackling the interplay of occupants' heating practices and building physics: Insights from a German mixed methods study. *Energy Res. Soc. Sci.* 32, 65–75. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2017.07.003>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2018). WHO Housing and health guidelines.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis supervisores, que me guiaron y apoyaron a lo largo de este proceso de crecimiento científico y personal. José Ignacio Linares fue el primero en encontrar en mí la capacidad y la voluntad de emprender este viaje y tuvo la paciencia de despejar cualquier duda, incluso cuando teníamos una visión diferente. José Carlos Romero ha sido para mí un mentor, un compañero y un amigo y me ayudó a ampliar las fronteras de mi investigación.

Además de mis dos supervisores oficiales de doctorado, he tenido la suerte de contar con Eva Arenas y Efraim Centeno. Su estrecha colaboración y tutoría me ayudaron a desentrañar el mundo de la investigación y a conseguir este objetivo. Otra contribución clave es la de los revisores internos y externos, que aportaron ideas útiles que elevaron el manuscrito de la tesis a un nivel académico superior.

Este trabajo de investigación ha contado con el apoyo de la Cátedra de Energía y Pobreza de la Universidad Pontificia Comillas, a cuyos patrocinadores se agradece especialmente: Fundación Naturgy, Endesa, EDP, Sedigas y Funcas. Además, quiero agradecer a las personas de las empresas mencionadas, de la Universidad y de las ONG colaboradoras que me han permitido participar en debates y colaboraciones transdisciplinares: los miembros del Consejo Asesor y del Comité Ejecutivo de la Cátedra de Energía y Pobreza (una mención especial para Cecilia Foronda y Leire Díez de ECODES) y las personas que forman parte de la red internacional de investigación (y amistad) ENGAGER.