

NUEVA METODOLOGÍA PARA FOMENTAR MEJORAS EN EECN

Ana Picallo-Perez, Doctoranda, Grupo de investigación ENEDI, UPV/EHU

Juan María Hidalgo-Betanzos, Investigador doctor, Grupo de investigación ENEDI, LCCE GV

José María Sala-Lizarraga, Director, Grupo de investigación ENEDI, UPV/EHU

Resumen: Se presenta una nueva herramienta para valorar el comportamiento energético de los EECN y la toma de decisiones en proyecto. Se analiza un ejemplo de unifamiliar pasiva, calculando demandas y consumos de calefacción y ACS con simulación horaria. Se utiliza la exergía para comparar las distintas formas de energía y niveles de calidad; ya que no ofrece las mismas posibilidades de conversión 1 kWh eléctrico que 1 kWh térmico en agua a 80 °C. Se valoran las pérdidas de exergía en las distintas etapas de conversión de la energía, identificando las mayores destrucciones de exergía. El objetivo es mejorar y elegir las tecnologías más idóneas. Los resultados manifiestan las enormes posibilidades de mejora de la eficiencia energética de los EECN.

Palabras clave: EECN, exergía, calidad, destrucción de exergía, eficiencia.

INTRODUCCIÓN. ANTECEDENTES

El consumo de energía en los edificios ha ido incrementando en estos últimos años, debido al aumento de la población, a la demanda cada vez mayor de ambientes saludables y confortables, etc. En Europa, los edificios son responsables del 40% del consumo de energía final y del 50% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, en tanto que, en España, el sector terciario (residencial y servicios) tiene un peso en el consumo del 28%, desglosado en un 18% las viviendas y un 10% los servicios (idea, 2013). Además, el sector de la edificación presenta un gran potencial de mejora energética.

Los diferentes tipos de energía tienen distinta capacidad para convertirse en otras formas. Esta disparidad de convertibilidad se refleja mediante la idea de la calidad de la energía, de manera que una misma cantidad de energía tiene más o menos calidad según su capacidad para convertirse en otras formas. Generalmente, entre todas las formas de energía se utiliza una como referencia, el trabajo, y por ello, la calidad de una energía se expresa en virtud de su capacidad para convertirse en trabajo.

De este modo, esta idea de utilidad se define como exergía y expresa la capacidad de una energía para convertirse en trabajo (Tsatsaronis, 2007). Hay formas de energía que se pueden convertir íntegramente en trabajo, como es el ejemplo de la energía eléctrica, de manera que en este caso toda la energía se identifica con la exergía. No obstante, hay otras formas de energía, como en el caso del calor, que solamente una parte se puede convertir en trabajo, por lo tanto, sólo una fracción de un flujo de calor es un flujo de exergía. Así, la exergía permite evaluar cuantitativamente los diferentes niveles de calidad de la energía.

La demanda de energía en los edificios tiene diferentes niveles de calidad. Cabe resaltar que al ser la demanda de calefacción y refrigeración una demanda de energía de baja calidad (su objetivo es mantener la temperatura del aire interior unos pocos grados por encima o por debajo de la del ambiente) no hay una adecuación entre la calidad de la energía utilizada y la de su destino final. En consecuencia, se producen importantes destrucciones de exergía (pérdidas de calidad), que son mucho mayores que las pérdidas de energía. Por lo tanto, reducir las pérdidas y destrucciones de exergía y aumentar por ende la eficiencia en un sistema significa disminuir las irreversibilidades, y, en definitiva, utilizar la energía de un modo más eficiente.

Esto hace pensar que, para reducir el consumo y hacer un uso eficiente de la energía en la edificación, se deben complementar los estudios energéticos basados en el Primer Principio con los estudios exergéticos, que tiene en cuenta también el 2° Principio. Estos análisis deben realizarse tanto para la envolvente del edificio como para sus instalaciones. Además, el objetivo debe ser optimizar todas las fases del proceso: desde el diseño, la construcción y puesta en marcha, el control y hasta el mantenimiento.

DEMANDA DE EXERGÍA DE UN EDIFICIO. METODOLOGÍA

La demanda de energía de un edificio es la cantidad de energía necesaria en un año para mantener su interior en condiciones de confort para los usuarios. De manera similar, la demanda de exergía es la cantidad de exergía requerida para mantener las condiciones de confort para los usuarios; y por tanto indica el contenido en exergía de la demanda de energía. De forma más práctica, podríamos decir que la demanda de exergía es el mínimo trabajo requerido para satisfacer la demanda de energía de un edificio.

Para aumentar la eficiencia de los EECN, el suministro de energía debe ser de la mínima calidad requerida, ya que de lo contrario se generaría destrucción de exergía. Un ejemplo ineficiente es la utilización de sistemas de calefacción a alta temperatura, 80 °C, para la calefacción de edificios a 21 °C (Picallo et al., 2017). En una situación ideal sería satisfacer la demanda de exergía del edificio, empleando la mínima exergía necesaria para cubrir las necesidades energéticas de confort interiores. Cualquier exceso de exergía dará lugar a una destrucción de exergía entre la instalación de generación (calefacción, refrigeración, ACS, ...) y el punto de demanda. El cálculo de la demanda de exergía se realiza a partir de los cálculos de la demanda de energía convencional. El método detallado, se desarrolla en el Annex 49 (Entrop & Brouwers, 2009) de la AIE.

En el caso de la calefacción, la demanda anual es el balance de pérdidas de calor (transmisión por envolvente considerando la inercia, ventilación e infiltración) menos ganancias (solares e internas).

$$\dot{Q}_{demand} = (\dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{inf}) - (\dot{Q}_{gsolar} + \dot{Q}_{gint}) \quad (1)$$

El factor de calidad (relación entre la exergía y la energía) de la energía interna de un sistema a temperatura T_{op} es menor que el factor de calidad asociado al calor a esa temperatura T_{op} . Por tanto, para determinar la demanda de exergía es necesario evaluar en primer lugar qué parte de esa demanda se necesita para calentar (o enfriar) el aire de ventilación, aportando el resto en forma de calor a la temperatura operativa del local.

En definitiva, para calcular la demanda de exergía es necesario separar la demanda en dos componentes: el primero se determina la exergía necesaria para acondicionar el aire de ventilación procedente del exterior y que se mezcla con el aire del recinto. La variación de exergía del aire entre las condiciones del interior y del exterior es la exergía mínima que hay que aportar para acondicionar ese aire. El segundo componente es el resto de la demanda de exergía, si existe, que se debe suministrar como calor a la temperatura operativa T_{op} .

Efectuado el balance de energía, se compara la demanda total de energía \dot{Q}_{demand} con las pérdidas por ventilación. Si éstas fueran menores que la demanda total, el aire de ventilación se tiene que calentar hasta la temperatura del interior del recinto T_{op} , lo que supone una aportación mínima de exergía, que se puede calcular con la expresión:

$$\dot{B}_{vent} = \dot{Q}_{vent} \cdot \left[1 - \frac{T_0}{(T_{op} - T_0)} \cdot \ln \left(\frac{T_{op}}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

donde \dot{Q}_{vent} es el calor que hay que aportar para calentar el aire hasta la temperatura del recinto:

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{vent} \cdot c_p \cdot (T_{op} - T_0) \quad (3)$$

La diferencia entre la demanda total y este calor \dot{Q}_{vent} se debe aportar como calor al recinto, a la temperatura T_{op} , de manera que la exergía complementaria a aportar es:

$$\dot{B}_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_{op}} \right) \cdot (\dot{Q}_{demand} - \dot{Q}_{vent}) \quad (4)$$

En caso de que la demanda total sea menor que las pérdidas por ventilación, el aire no necesita ser calentado hasta la temperatura T_{op} y no se requiere calor adicional, ya que éste es aportado por las ganancias internas y solares. La temperatura a la que habrá que calentar el aire será:

$$\Delta T_{vent} = \frac{\dot{Q}_{demand}}{\dot{Q}_{vent}} \cdot (T_{op} - T_0) \quad (5)$$

y por lo tanto la exergía total a aportar será:

$$\dot{B}_{vent} = \dot{Q}_{vent} \cdot \left[1 - \frac{T_0}{\Delta T_{vent}} \cdot \ln \left(\frac{\Delta T_{vent} + T_0}{T_0} \right) \right] \quad (6)$$

En el caso de la refrigeración, cuando $T_0 > T_{op}$ todos los flujos naturales de energía representan ganancias no deseadas, de manera que siempre se va a cumplir que $\dot{Q}_{demand} > \dot{Q}_{vent}$. En consecuencia, el aire de ventilación siempre necesita ser enfriado hasta la temperatura T_{op} . Sin embargo, en el caso de refrigeración en que $T_0 < T_{op}$, la necesidad de enfriamiento (salida de energía) no representa una demanda de exergía, sino más bien es una cesión de exergía no deseada. Esta exergía es cedida al edificio por las ganancias internas y podría ser de alguna manera recogida y aprovechada como calor a la temperatura T_{op} . En todas estas situaciones, se comprueba que la demanda de exergía es alrededor del 10% de la de energía (en función de T_0 y T_{op}).

CASO DE ESTUDIO. RESULTADOS Y DATOS OBTENIDOS

Para familiarizarse con este método explicado anteriormente y comprender mejor el uso de la exergía en la edificación, se ha aplicado en un ejemplo de edificio de consumo energía casi nulo. Se ha seleccionado una casa unifamiliar (Figura 1 a) con una superficie de 176 m² y ubicado en Álava, en zona climática D1.



Figura 1. Vivienda unifamiliar monitorizada en Álava (a) y sus instalaciones de calefacción y ACS (b)

Las instalaciones térmicas consisten en una estufa de biomasa modulable (2.4 - 9 kW) para calefacción. El ACS se produce mediante una combinación de un colector solar (1 módulo de 2.3 m²) que precalienta el agua y una bomba de calor aerotérmica aire-agua (3.6 kW) con almacenamiento interno de 300 l (Figura 1 b). La vivienda tiene recuperador de calor en la ventilación y no existe refrigeración activa. La demanda anual de calefacción es menor de 15 kWh/m²a y tiene la certificación Passive House (Hidalgo, 2017).

Estudio de la envolvente

Los datos de calefacción se han calculado en un modelo de simulación dinámica en EnergyPlus, validado mediante una monitorización durante 1 año (Hidalgo et al., 2015). El cálculo horario de ACS se ha realizado mediante una simulación de la vivienda en condiciones estándar de 5 personas con TRNSYS v17.

De este modo, se obtienen los valores horarios de demanda energética, de acuerdo con el balance representado en la ecuación (1) donde las entradas se compensan con las salidas. La Figura 2 a) muestra el balance energético anual por m² de vivienda y la Figura 2 b) el balance exergético. Es de resaltar la enorme diferencia que existe entre esos valores, así como el hecho de que las destrucciones de exergía representan el 21% de la demanda total de exergía de la vivienda.

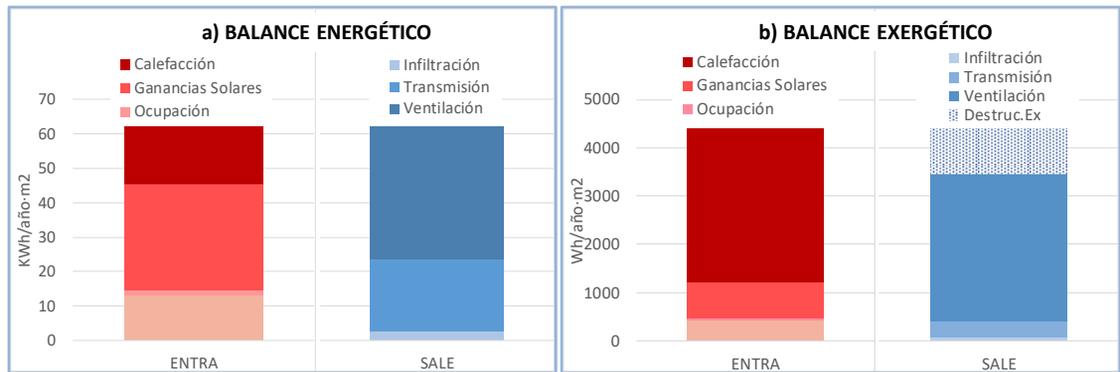


Figura 2: Balance energético (a) y exergético (b) para la calefacción

En la Figura 3 a) se presentan los valores de las ganancias y pérdidas mensuales obtenidos en términos de energía, mientras que en la Figura 3 b) se representan los valores de la exergía (nótese que la escala del kWh/mes del gráfico b) es 5 veces menor). Además, se han añadido los perfiles de temperatura exterior T_{ext} y el de la temperatura operacional del edificio T_{op} de forma que se comprendan mejor las demandas.

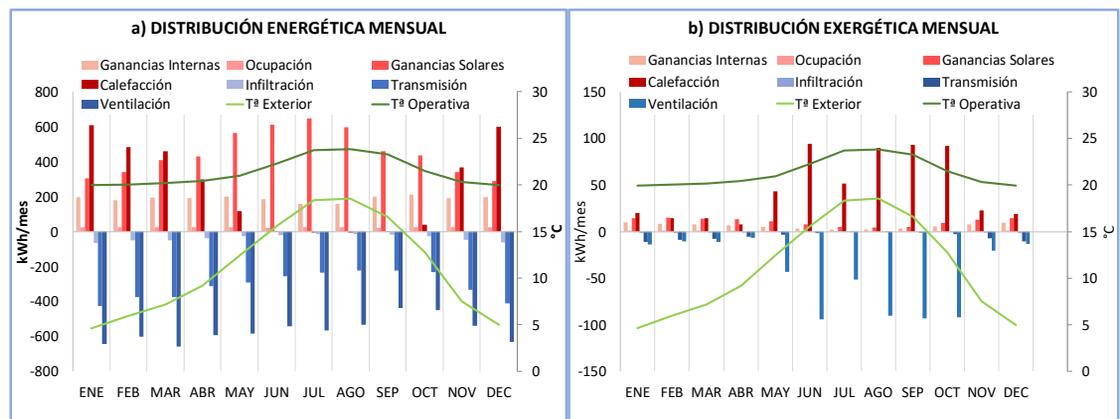


Figura 3: Ganancias y pérdidas mensuales energéticas (a) y exergéticas (b)

En la Figura 4 a) se presentan las demandas horarias de calefacción energía y exergía para el día 15 de febrero. Adicionalmente, se han añadido la T_{ext} así como el factor exergético.

Así mismo se ha obtenido la demanda de ACS, para lo que se ha utilizado el perfil horario obtenido mediante el software IEA-SHC Task26 (Ulrike Jordan, 2003). La demanda anual de ACS en energía es de 459 kWh/año·pers, y en exergía 46 kWh/año·persona. La Figura 4 b) representa la demanda de energía y exergía para el ACS en ese mismo día 15 de febrero.

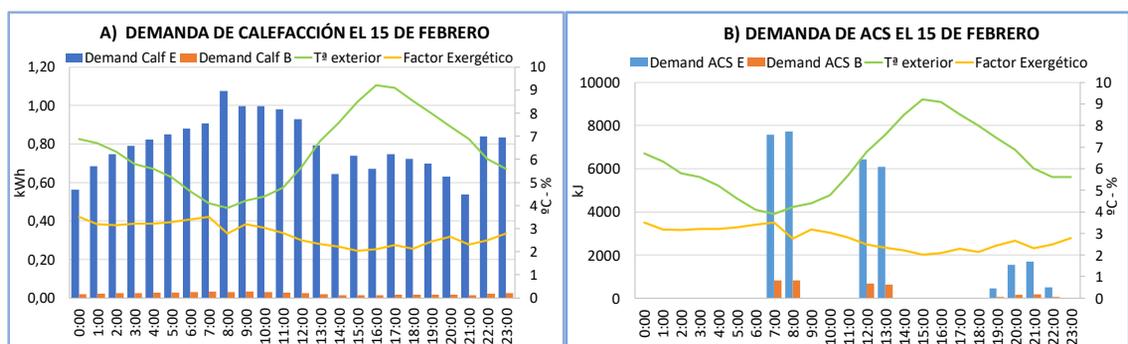


Figura 4: Demandas horarias energéticas y exergéticas de calefacción (a) y ACS (b), de un día tipo de invierno

Estudio de las instalaciones

Uno de los aspectos más útiles de la metodología basada en exergía es la localización de las ineficiencias debidas a las transformaciones de energía. La Figura 5 ilustra la cadena de transformación energética (en energía y exergía) para el circuito de ACS (En_{ACS} y Ex_{ACS}), para la calefacción (En_{calif} y Ex_{calif}), así como para el Total (En_{TOT} y Ex_{TOT}). Las etapas de esta cadena son: energía primaria, generación, distribución, almacenamiento y demanda final. La simple observación del perfil de exergía nos indica dónde ocurren las mayores destrucciones exergéticas, que se producen tanto en la transformación de energía primaria para calentar el agua del circuito, como en la salida de los tanques para cubrir la demanda final del usuario. Así mismo, se muestran las grandes diferencias de escala que hay entre la exergía y la energía. Esta diferencia es el parámetro es precisamente el que señala la capacidad de hacer trabajo útil.

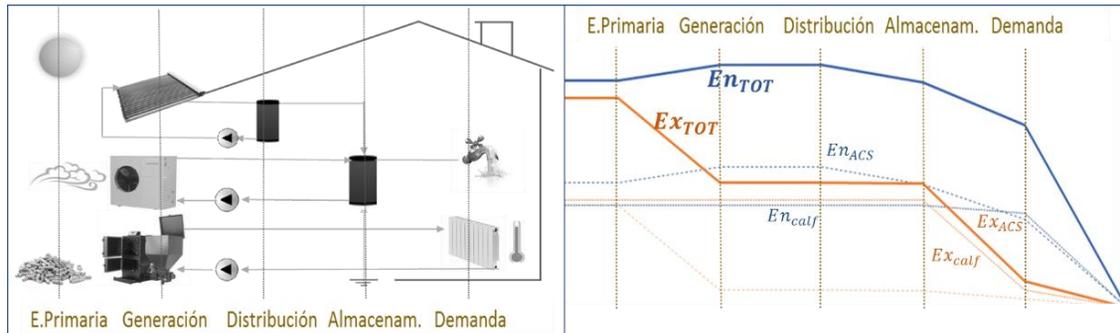


Figura 5: Cadena de transformación energética y exergética en las instalaciones térmicas

Estudio de costes

El coste medio del kWh de calefacción es $6.89 \frac{c\text{€}}{kWh}$. Los costes de ACS corresponden a $21.81 \frac{c\text{€}}{kWh}$ cuando se genera exclusivamente con la bomba de calor y se reducen a $17.99 \frac{c\text{€}}{kWh}$ gracias al aporte solar térmico. En estas cantidades también se han incluido los costes de adquisición y amortización de los equipos.

DISCUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

Los análisis energéticos convencionales están basados en el Primer Principio de la termodinámica. Ese tipo de análisis están limitados a una simple contabilidad energética, que cuantifica las entradas y salidas de energía en el sistema o edificio. De esta forma, la energía que se aporta en los procesos con los combustibles, electricidad, flujos de materia, etc., debe encontrarse en los productos o subproductos. Bajo esta perspectiva se consideran como pérdidas las salidas de energía que no son utilizadas.

Del mismo modo, el rendimiento o eficiencia de los procesos y equipos se expresa habitualmente mediante coeficientes basados en el Primer Principio. Pese a que existen diversas maneras de expresar estos rendimientos, ninguna de ellas tiene en cuenta la calidad de la energía. En consecuencia, se asigna el mismo rendimiento a las distintas formas de la energía, independientemente de su calidad. Ello da origen a una serie de inconvenientes en la interpretación de la eficiencia de los equipos. Por ejemplo, el hecho de que el rendimiento de la máquina de Carnot sea el factor de Carnot y no la unidad (que es lo que uno espera para la máquina perfecta), según la idea comúnmente aceptada de rendimiento. Por otro lado, la eficiencia de una bomba de calor que se expresa mediante el COP, un índice siempre mayor que la unidad, etc. De este modo, la eficiencia de grandes centrales termoeléctricas, que se encuentran entre los sistemas de conversión de energía más eficientes, presentan rendimientos bajos (entre ~ 40-55%), mientras que las calderas individuales de calefacción, que termodinámicamente son aparatos mucho menos eficientes, aparecen con unos elevados rendimientos (~ 90%).

Por el contrario, las definiciones de la eficiencia basadas en la exergía describen mejor la manera en que se utilizan los recursos y proporcionan una guía más clara acerca de las posibles mejoras que pueden introducirse. Esto especialmente útil en edificios con bajas demandas de energía, como los EECN. La destrucción de exergía es una medida válida de la irreversibilidad de un proceso: el método exergético permite valorar directamente las pérdidas reales de los procesos, es decir, evalúa la disminución en el trabajo disponible de cada una de las fuentes energéticas utilizadas, desde el inicio hasta el final de cada proceso considerado.

Sin embargo, el método exergético no permite determinar el efecto de las irreversibilidades de cada equipo sobre el consumo adicional de recursos globales, es decir, no permite determinar el impacto en el consumo de combustible ocasionado por el funcionamiento inadecuado de un equipo determinado. Para alcanzar ese objetivo se desarrolla la Termoeconomía (Picallo et al., 2016), que combina el Segundo Principio con conceptos económicos. Desarrolla el concepto de coste exergético de cada flujo, que es la exergía consumida para producir el flujo, calculada a partir de su proceso de formación. Es el coste exergético el factor de peso de cada irreversibilidad sobre el consumo de recursos globales, pero para determinar esos costes exergéticos (Picallo et al. 2017), además de las exergías de los flujos, es necesario definir la estructura productiva de la instalación. Este tipo de análisis es especialmente adecuado para las instalaciones a mayor escala, como por ejemplo en las centrales de distrito o district heating.

AGRADECIMIENTOS

La autora, Ana Picallo, agradece y reconoce el apoyo que le ha proporcionado el Ministerio de Educación del Gobierno español a través de una beca otorgada para completar su doctorado. Los autores, además, dan las gracias también al Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación (LCCE) del Gobierno Vasco por los datos del caso de estudio y la monitorización de la vivienda. Finalmente, agradecer a la familia Uriarte por su disposición y colaboración durante la monitorización de la vivienda; y a CLIM arquitectura por los datos del proyecto del caso de estudio.

REFERENCIAS

- IDAE. Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. Gobierno de España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- Tsatsaronis, G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 32(4), 249-253.
- Picallo.A., Sala JM, Pérez D, Gomez I (2017). Aplicación de la Termoeconomía para una gestión inteligente de instalaciones de climatización. 8º Congreso Europeo sobre Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo.
- Entrop, A. G., & Brouwers, H. J. H. ECBCS Annex 49.
- Hidalgo JM, Dissertation (2017): Adaptation of single-family houses to the nZEB objective In cool-temperate climates of Spain
- Hidalgo JM, Psomas T, García-Gáfaró C, Heiselberg P, Millán JA. Overheating Assessment of a Passive House Case Study in Spain. 36th AIVC Conference. Madrid, 2015.
- Ulrike Jordan K. IEA-SHC Task 26, Tool for the Generation of Domestic Hot Water (DHW) Profiles on a Statistical Basis
- Picallo, A., Escudero, C., Flores, I., & Sala, J. M. (2016). Symbolic thermoeconomics in building energy supply systems. *Energy and Buildings*, 127, 561-570.
- Picallo-Perez, A., Sala-Lizarraga, J. M., & Escudero-Revilla, C. (2017). A comparative analysis of two thermoeconomic diagnosis methodologies in a building heating and DHW facility. *Energy and Buildings*, 146, 160-171.