

PROPUESTA DE UN PARÁMETRO DE EFICIENCIA EXERGÉTICA PARA EDIFICIOS Y VIVIENDAS

J. J. Eliçabe Urriol^{1,2}, H. A. Belluccia² y H. D. Navone^{2,3}

¹ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

² Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR), Av. Pellegrini 250, Rosario, Argentina
E-mail: elicabe@fceia.unr.edu.ar

³ Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNR), 27 de Febrero 210 Bis, Rosario, Argentina

Recibido: 11-12-14; Aceptado: 24-07-15.

RESUMEN.- Se comenta el rol del primer y segundo principio de la Termodinámica en el análisis de la performance térmica de viviendas y edificios. El concepto de exergía se presenta en forma básica. Se propone una simple fórmula para caracterizar la eficiencia exergética de una dada vivienda. También se dan ejemplos de aplicación. Se establecen conclusiones preliminares.

Palabras claves: exergía, eficiencia, edificios, viviendas, solar-pasiva

A PROPOSITION OF A PARAMETER FOR THE EXERGETIC EFFICIENCY OF DWELLINGS AND BUILDINGS

ABSTRACT.- It is made a comment on the role that first and second laws of Thermodynamic play in the thermal performance analysis of dwellings and buildings. The exergy concept is presented in a basic way. It is posed a simple formula to characterize the exergetic efficiency of a given dwelling. Application examples are also given. Preliminary conclusions are stayed.

Keywords: exergy, efficiency, buildings, dwellings, solar-passive

1. INTRODUCCIÓN

Al diseñar edificios y viviendas es preciso conciliar los requerimientos de confort higrotérmico, lumínico y acústico, y una muy buena calidad del aire interior, con un bajo “costo energético” de funcionamiento (Manzano-Aguilario *et al.*, 2015; Koroneos y Kalemakis, 2012). Para determinar este último, se impone la condición de que los distintos flujos de energía que entran ó salen de la vivienda deben satisfacer el primer principio de la Termodinámica. Es decir, se escribe una ecuación de balance que permite despejar los términos correspondientes a los aportes de las redes de gas y de electricidad, y de otros combustibles.

Resulta interesante notar que en la literatura específica sobre este tema, las referencias al segundo principio aparecen en trabajos relativamente recientes (Shukuya y Hammache, 2002; Sciubba y Wall, 2007), en donde se empieza a prestar atención al potencial (máximo teórico) trabajo útil que puede extraerse de una fuente de energía respecto a un dado ambiente de referencia, esto es, la exergía de la fuente.

Desde este marco conceptual, pueden emplearse ahora con propiedad expresiones tales como “consumo de exergía” y “ahorro de exergía”, en lugar de las discutibles frases: “consumo de energía” y “ahorro de energía”; puesto que la energía siempre se conserva (Shukuya, 2009).

En la bibliografía sobre ambiente construido es posible constatar la presencia de variantes en la aplicación de la metodología de análisis exergético, con diferencias inclusive en la definición de eficiencia exergética (Shukuya y Hammache, 2002; Sciubba y Wall, 2007). No obstante, podría hablarse de un común denominador: la identificación, en primer lugar, de los niveles de exergía requeridos para cada tarea o funcionalidad del sistema (calefacción, provisión de agua caliente, accionamiento de equipos eléctricos, etc.) y, luego, el estudio de la adecuación del respectivo suministro de exergía de forma tal de minimizar las pérdidas.

Se ve así con mayor claridad la conveniencia de disminuir la cantidad de exergía que los edificios y viviendas toman de las redes de gas y de electricidad, y de otros servicios de distribución de combustibles, a los efectos de no comprometer la atención de la demanda exergética de otros sectores (industria, transporte, etc.) y de minimizar los impactos ambientales de estos sistemas (Koroneos y Kalemakis, 2012; El shenawy y Zmeureanu, 2013).

En este artículo se presenta un indicador (figura de mérito) que sirve para calificar una determinada vivienda en relación a una Vivienda Solar Pasiva Ideal (VSPI) que no utilice exergía de red (ó de otro combustible) para climatización, o sea, para el logro de las condiciones de confort interior requeridas (Manzano-Aguilario *et al.*, 2015).

Se supone que en la VSPI la demanda de energía para iluminación, conservación de alimentos, calentamiento de agua y cocción se satisface de forma convencional. Esta restricción permite asignar a la misma un consumo exergético de red básico en forma sencilla (sección 4 de este trabajo). De cualquier manera, el índice o parámetro de eficiencia exergética construido a partir del concepto de VSPI es sensible (en sentido positivo) a la incorporación de técnicas pasivas (Schmidt, 2005), tales como las de iluminación natural y las de calentamiento solar de agua (Ibáñez Plana *et al.*, 2011).

Es importante destacar que los programas de investigación consolidados en esta temática utilizan métodos avanzados de transferencia de calor desde hace varias décadas a los efectos de determinar la respuesta térmica de diversas configuraciones de la envolvente frente a las variaciones ambientales, para así reducir el "gasto energético" de climatización (Pratt, 1981; Sadineni *et al.*, 2011). Sin embargo, la incorporación de aspectos dinámicos y el aporte de fuentes de energía renovables en los cálculos exergéticos es relativamente reciente, como se comenta en Gonçalves *et al.* (2013) cuando se hace referencia al método propuesto por Schmidt (2004, 2005).

2. EXERGÍA: CONTEXTO TEÓRICO Y DEFINICIONES OPERATIVAS

En primer lugar, consideremos un sistema cerrado, esto es, un sistema a presión P y temperatura T en donde sólo pueden ocurrir procesos de intercambio de energía-entropía con un entorno o ambiente estable a presión P_o y temperatura T_o , que se define y toma de referencia (Lozano y Valero, 1986; Moran y Shapiro, 2004).

En estas condiciones, y siempre que exista un desequilibrio termodinámico entre el sistema y el ambiente estable de referencia, resulta posible extraer trabajo del sistema.

Entonces, si se excluye el trabajo por cambio de volumen del sistema, surge la cuestión de cuánto trabajo útil es posible obtener mediante algún proceso conveniente que lleve el sistema desde su estado original hasta un estado en equilibrio con el ambiente de referencia.

Este máximo de trabajo teórico se conoce como la exergía X del estado original del sistema, definida en relación al ambiente estable que se toma de referencia.

A partir de la primera y de la segunda ley de la Termodinámica es posible calcular la exergía X de un sistema en función de los valores de las variables de estado del sistema y de la energía potencial y cinética (Levenspiel, 1997; Moran y Shapiro, 2004):

$$X = -\left[U_o - (U + E_p + E_k)\right] + T_o (S_o - S) - P_o (V_o - V) \quad (1)$$

Donde, S es la entropía; V el volumen y U , E_k y E_p son la energía interna, cinética y potencial (gravitacional, eléctrica, etc.), respectivamente, correspondientes al sistema en el estado original. En tanto que: U_o , T_o , S_o y V_o definen la energía interna, temperatura, entropía y volumen del sistema

en el estado de equilibrio con el ambiente estable de referencia.

La Ec. (1) se obtiene considerando que, en una etapa genérica de un dado proceso que lleva el sistema desde el estado original al estado de equilibrio, siempre es posible disponer –al menos idealmente– de una máquina de Carnot con el fin de recoger el calor expulsado por el sistema y producir trabajo adicional.

Si ahora consideramos un sistema abierto, es decir, en donde hay un intercambio de materia con el ambiente de referencia, utilizando una argumentación similar a la anterior es posible deducir que la exergía x por unidad de masa de la sustancia que fluye está dada por (Levenspiel, 1997; Shukuya, 2013):

$$x = -\left[h_o - (h + e_p + e_k)\right] + T_o (s_o - s) \quad (2)$$

Donde h es la entalpía del sistema en el estado original y h_o la entalpía correspondiente al estado de equilibrio con el ambiente estable de referencia. El resto de los símbolos tiene el mismo significado ya establecido en la Ec. (1), salvo que ahora se denotan en minúscula para indicar que están dados por unidad de masa de la sustancia que fluye.

Si el sistema es abierto y, además, posee una composición química distinta a la del ambiente, entonces es posible extraer trabajo (exergía) a partir de la difusión debida a las diferencias de composición entre sistema y ambiente. Sumado a ello, también es factible que las componentes del sistema reaccionen químicamente con el entorno y, en consecuencia, también se podría extraer trabajo (exergía) a partir de las propias reacciones involucradas en el proceso (Shukuya, 2013).

Entonces, para un sistema abierto en desequilibrio térmico, mecánico y químico con el ambiente, reactivo o no reactivo químicamente, la exergía por unidad de masa está dada por (Lozano y Valero, 1986):

$$x = (h - h_o) - T_o (s - s_o) + \sum_j Y_j (\mu_j - \mu_{j,o}) \quad (3)$$

Donde, $(h - h_o)$ y $(s - s_o)$ son las variaciones de la entalpía y de la entropía por mol entre el estado original y el estado de equilibrio con el ambiente de referencia, respectivamente; Y_j es la fracción molar de la especie j ; μ_j es el potencial químico por mol de la especie j luego de que las interacciones termomecánicas del sistema lo llevaron a alcanzar la presión P_o y la temperatura T_o ; y $\mu_{j,o}$ es el potencial químico por mol de la especie j en equilibrio químico con el ambiente estable de referencia.

Finalmente, es importante destacar que: cuando en un proceso real un sistema evoluciona produciendo trabajo a costa de una pérdida de exergía ΔX , el trabajo de eje (útil) obtenido siempre resulta inferior a ΔX . Para sistemas cerrados, a partir de la Ec. (1) se puede demostrar que el trabajo de eje perdido $W_{perdido}$ viene dado por (Levenspiel, 1997):

$$W_{perdido} = T_o \Delta S_{universo} \quad (4)$$

Donde “universo” refiere al sistema y alrededores.

3. FLUJOS DE EXERGÍA A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE

Una vivienda puede considerarse como un sistema termodinámico que tiene por frontera a la envolvente de la misma. En algunos casos puede ser conveniente tomar una superficie de control algo mayor a los efectos de incluir, además del espacio cubierto, algunos elementos externos de interés como se muestra en la figura 1.

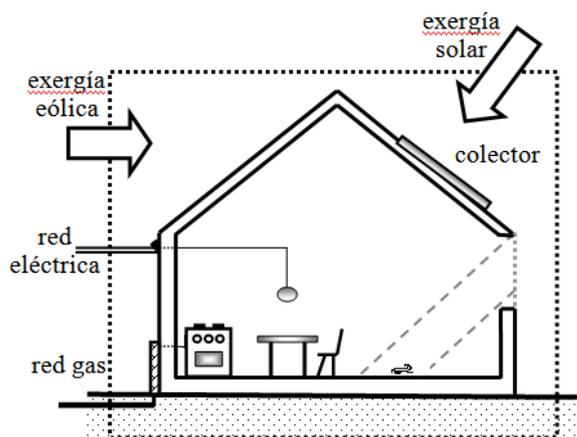


Fig. 1: Se muestran los flujos de exergía de red (electricidad y gas) y ambientales (eólico y solar) incidentes sobre una vivienda.

Los flujos de exergía ingresantes al sistema pueden agruparse en dos categorías: de red y ambientales -solar (Candau, 2003; Kabelac y Drake, 1992) y eólico (Dincer y Rosen, 2013; Eke *et al.*, 2005), principalmente-.

Los flujos de energía de red (electricidad, GN) tienen flujos de exergía asociados de alto valor porcentual (Lozano y Valero, 1986). Un flujo de energía eléctrica de 1 kW representa un flujo de exergía de casi 1kW, esto es, su eficiencia exergética es de aproximadamente el 100%; para el GN este índice se sitúa en un 98% (Koroneos y Kalemakis, 2012). En términos comparativos, si consideramos agua a 90 °C, el porcentaje de exergía baja hasta aproximadamente un 10% (Shukuya, 2013).

La exergía suministrada por las redes (u otros combustibles como el GLP, leña, etc.) se consume casi totalmente para hacer funcionar:

- artefactos de climatización (calefactores y acondicionadores), y
- otros artefactos, a gas ó eléctricos, para calentamiento de agua, cocción, iluminación, conservación de alimentos, planchado, etc.; vale decir, todos los “electrodomésticos” (en sentido amplio) que no se usen para climatizar.

Distintas técnicas de acondicionamiento pasivo, tales como aislación térmica, techos verdes, muros colectores-acumuladores (Gaspar y Eliçabe Urriol, 1985; Ibáñez Plana

et al., 2011) y ganancia solar directa (Sachs *et al.*, 1982; Discoli, 2011), entre otras alternativas de diseño o de intervención sobre la envolvente (Sadineni, 2011), permiten disminuir significativamente el consumo de exergía de los artefactos tipo a (Shukuya y Komuro, 1996).

El consumo de exergía relativo a los aparatos de tipo b se denominará X_{min} . La abreviatura “min” alude a que, aún en el caso en el que la climatización sea completamente pasiva, hace falta un mínimo consumo de exergía para el funcionamiento de los artefactos de la vivienda (Schmidt, 2005). Naturalmente, X_{min} presenta variaciones de acuerdo a la estructura y hábitos del grupo de habitantes de la vivienda, pero en el presente trabajo se asume que es posible fijar un valor de referencia.

Por otro lado, el flujo de exergía de la radiación solar (Candau, 2003) incidente sobre una vivienda también se consume en procesos irreversibles de absorción ó se devuelve en parte al ambiente por reflexión. Nótese que esta “pérdida” de exergía solar, en los casos que medie una buena arquitectura solar, permite el ahorro de exergía de red por menor consumo de los artefactos de tipo a.

La producción de trabajo a partir de la radiación solar incidente sobre una vivienda no es condición *sine qua non* para que ésta reciba la denominación de solar -ó de bioclimática-; lo esencial en ese caso es su capacidad para generar un ambiente interno aceptable por sí misma, esto es, sin requerir energía auxiliar (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015). Sin embargo, también resulta de suma importancia tener en cuenta que en algunas situaciones, que se dan en cualquier tipo de vivienda, es posible aprovechar una pequeña proporción de la exergía ambiental incidente para generar una cierta cantidad de trabajo W por medio de paneles fotovoltaicos, generadores eólicos y/ó sistemas híbridos (Eke *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2009; Marszal *et al.*, 2011; Dincer y Rosen, 2013).

4. EFICIENCIA EXERGÉTICA DE UNA VIVIENDA

Si se excluye el caso de una VSPI, una vivienda real (ó “standard”) requiere siempre una cierta cantidad de exergía de red para climatización. Por lo tanto, la exergía total de red, que se indicará con X_{red} , debe cumplir la relación

$X_{red} > X_{min}$, hecho que permite definir para la vivienda una eficiencia dada, en principio, por: X_{min} / X_{red} .

Ahora bien, para incluir también los casos en donde a partir de la exergía del ambiente se genera trabajo usando algún dispositivo de conversión (celdas fotovoltaicas, por ejemplo), en este estudio se propone definir a la eficiencia exergética de la vivienda como:

$$\eta = \frac{X_{min}}{X_{red} - W} \quad (5)$$

Donde, X_{red} es el consumo de exergía de red y W es el trabajo generado a partir de la exergía del ambiente.

Se justifica la expresión “eficiencia exergética” dado que, si se toma X_{\min} como una constante de referencia, de acuerdo a la Ec. (5) resulta que un valor alto de η se asocia con una baja demanda de exergía de red y, además, η crece con la cantidad de trabajo obtenida del ambiente (en este estudio se supone el caso más general, donde: $W < X_{red}$).

Nótese que, si bien en cualquier vivienda se consume exergía *in situ*, las construcciones de bajo η generan mayores pérdidas en los procesos de transformación y de distribución de la exergía obtenida de las fuentes primarias (yacimientos fósil, material fisionable, curso de agua, etc.). En dichos procesos se desaprovecha, en general, una gran parte de la exergía inicial de la fuente primaria, con la consecuente producción de entropía en el ambiente (Schmidt, 2005; Shukuya, 2013).

5. ESTUDIOS DE CASO

Como punto de partida para el cálculo de la eficiencia η es necesario establecer un consumo básico de exergía X_{\min} de los artefactos de tipo b (aquellos que no se usan para climatizar la vivienda). Esta cuestión merecería una investigación aparte dada la complejidad de los diversos factores socio-económicos y culturales en juego (INTI, 2009; Schmidt, 2005).

A los efectos de ilustrar el uso del índice η definido en la Ec. (5), y basándonos en INTI (2009), se adopta para una vivienda habitada por un núcleo familiar de 4 personas un consumo básico de 50 m³ de gas natural (GN) y de 100 kWh de energía eléctrica.

A partir de la Ec. (3), y realizando algunas suposiciones adicionales (Lozano y Valero, 1986; Shukuya y Hammache, 2002), es posible calcular la exergía del gas natural considerándolo como una mezcla constituida principalmente por metano (95%), etano (3%) y propano (1,5%), además de otros componentes presentes en proporciones mucho menores. La exergía resultante, suponiendo un ambiente de referencia caracterizado por $P_o = 1\text{ atm}$ y $T_o = 25^\circ\text{C}$, es de $8,72 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$; valor que nos da un factor de conversión de 10,8 kWh/m³ para el GN.

De esta manera, es posible establecer un consumo básico de exergía para todos los artefactos del grupo b, dado por el siguiente valor: $X_{\min} = 640 \text{ kWh/mes}$.

A continuación se presentan tres estudios de caso en donde se evalúa el índice de eficiencia exergética η que se propone en este trabajo.

Caso 1: Vivienda Solar Pasiva Ideal (VSPI)

En primer lugar, se considera una vivienda con un consumo mensual promedio de 50 m³ de GN y 100 kWh de energía eléctrica. En este caso, se tiene que la exergía de red coincide con el valor mínimo calculado anteriormente, resultando: $X_{red} = X_{\min} = 640 \text{ kWh/mes}$ y $\eta = 1$.

Caso 2: Vivienda “standard”

A partir de INTI (2009) es posible estimar que el consumo mensual para una vivienda “standard” es de, aproximadamente, 100 m³ de GN y 300 kWh de energía eléctrica, si bien en dicho estudio no se han controlado las condiciones de confort higrotérmico. Entonces, el consumo de exergía de red es: $X_{red} = 1380 \text{ kWh/mes}$; y el índice de eficiencia exergética asociado a esta vivienda resulta ser: $\eta = 0,464$.

Caso 3: Vivienda “standard” con paneles fotovoltaicos

En este caso, se considera la misma vivienda del ejemplo anterior, con igual dotación de artefactos y patrón de uso de los mismos, pero agregando paneles fotovoltaicos. Para poder estimar el trabajo asociado a estos dispositivos se supone una superficie horizontal de captación es de 10 m², una irradiancia solar diaria promedio de 17 MJ/m² y una eficiencia de conversión del 13%. Estas consideraciones nos permiten calcular una producción de trabajo que alcanza el valor de: $W = 184 \text{ kWh/mes}$; resultando un índice de eficiencia exergética para la vivienda considerada de $\eta = 0,535$. En este último caso resulta interesante destacar que la electricidad generada puede ser usada en la propia vivienda ó bien ser entregada (vendida) a la red de distribución, situación que presupone interacciones entre el sistema y la red (Marszal *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2009).

Los casos presentados tienen como propósito mostrar de manera sencilla cómo se calcula y utiliza el índice propuesto en diferentes situaciones de carácter ejemplar. En términos generales, para el cálculo de este indicador en una situación real es necesario relevar la dotación de artefactos de tipo b (luminarias y “electrodomésticos”, en general) presentes en la vivienda, así como sus tiempos o patrones de uso, y con esta información se calcula el valor de X_{\min} para el período en estudio. Luego, se obtiene el consumo de exergía de red de la vivienda para el mismo período, realizando las conversiones que sean necesarias para la provisión de GN específica de la zona de emplazamiento, y así se calcula el valor del parámetro X_{red} , asumiendo condiciones de confort higrotérmico. Finalmente, si existe, se incluye la producción de trabajo que ingresa al sistema a partir del aprovechamiento de la exergía ambiental disponible. Con todos estos datos se obtiene el índice η asociado a la vivienda en estudio para el período considerado.

Finalmente, es necesario destacar que el análisis detallado de casos concretos escapa a los alcances de este trabajo, puesto que el propósito fundamental del mismo ha sido la construcción de un índice que permite caracterizar la eficiencia exergética de edificios y viviendas; no obstante, en esta sección hemos expuesto los lineamientos generales para su determinación en situaciones reales.

6. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha propuesto un indicador de la performance de segundo principio de una vivienda sobre la idea de una vivienda ideal de referencia (VSPI) que se climatiza de manera totalmente pasiva y tiene un consumo de exergía de red típico para el funcionamiento de sus artefactos (excluidos los de climatización). En su definición, también se considera la posible producción de trabajo a partir de la exergía ambiental disponible.

Puesto que los edificios y viviendas son sistemas complejos que interactúan con el ambiente demandando un uso intensivo de exergía, la construcción de indicadores ambientales que permitan caracterizar estas unidades constituye una imperiosa necesidad en la actualidad. El indicador que hemos propuesto en este trabajo –establecido en la Ec. (5)- cumple con los principales criterios utilizados para la definición de este tipo de índices (Koroneos y Kalemakis, 2012), dado que: es representativo del sistema que pretende caracterizar; provee información que posibilita la toma de decisiones para minimizar o mitigar impactos ambientales; las variables que intervienen en su definición son pocas y, además, accesibles, tanto para el ámbito especializado, como para los decisores y el público, en general; en su definición intervienen parámetros de alta riqueza conceptual que sirven de guía para focalizar la atención profesional, pública y gubernamental sobre las problemáticas ambientales asociadas con estos sistemas y, además, cumple con el requerimiento de estar definido en forma simple, precisa y concisa. Desde este marco de análisis, esperamos que la presente propuesta sea de utilidad en el diseño de políticas energéticas sustentables.

Teniendo en cuenta todo lo expuesto en este estudio, la planificación e implementación de estrategias de política pública para: (1) promover el aprovechamiento pasivo de la radiación solar; (2) garantizar la accesibilidad y el uso de tecnologías para la producción de trabajo a partir de la exergía ambiental disponible; y (3) incentivar la inclusión de mejoras en la eficiencia de los artefactos domésticos, entre otras acciones posibles, se verán claramente reflejadas en una elevación del parámetro η .

Finalmente, es importante destacar que en la presente contribución no se han tenido en cuenta los costos exergéticos (“exergías base”) asociados a la construcción de la vivienda y a la fabricación de sus artefactos, tema de importancia para futuras investigaciones sobre esta problemática (Koroneos y Kalemakis, 2012; El shenawy y Zmeureanu, 2013; Hoque *et al.*, 2015).

REFERENCIAS

- Candau, Y. (2003). On the exergy of radiation. *Solar Energy* **75**, 3, 241-247.
- Dincer, I., Rosen, M. (2013). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Amsterdam: Elsevier.
- Discoli, C., Viegas G., San Juan G. (2011). Viviendas bioclimáticas en Tapalque. Sistema de climatización por muros acumuladores de calor (MAC): Resultados preliminares. *Avances en energías renovables y medio ambiente* **15**, 75-82.
- Eke, R., Kara, O., Ülgen, K. (2005). Optimization of a Wind/PV Hybrid Power Generation System. *Int. J. of Green Energy* **2**, 1, 57-63.
- El shenawy, A., Zmeureanu, R. (2013). Exergy-based index for assessing the building sustainability. *Building and Environment* **60**, 202-210.
- Gaspar, R., Eliçabe Urriol, J.J. (1985). Analysis of solar walls by means of polynomial approximations of initial and boundary conditions. *Energy and buildings* **8**, 239-245.
- Gonçalves, P., Rodrigues Gaspar, A., Gameiro da Silva, M. (2013). Comparative energy and exergy performance of heating options in buildings under different climatic conditions. *Energy and Buildings* **61**, 288-297.
- Hoque, M.R., Villaba Méndez, G., Durany, X.G., Sala, C.S. (2015). Exergy analysis of construction material manufacturing processes and assessment of their improvement potentials. *Int. J. Exergy* **16**, 1, 22-52.
- Ibáñez Plana, M., Rosell Polo, J.R., Rosell Urrutia, J.I. (2011). *Tecnología Solar*. Madrid: MP.
- INTI, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, (2009). Iniciativas para el uso racional de la energía. En: http://www.infoleg.gov.ar/basehome/actos_gobierno/act_osdegobierno19-1-2009-3.htm. Recuperado el: 06/07/15.
- Kabelac, S., Drake, F. D. (1992). The entropy of terrestrial solar radiation. *Solar Energy* **48**, 4, 239-248.
- Koroneos, C., Kalemakis, I. (2012). Exergy indicators in the building environment. *Int. J. Exergy* **11**, 4, 439-459.
- Levenspiel, O. (1997). *Fundamentos de termodinámica*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Lozano, M.A., Valero, A. (1986). Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial. *Ingeniería Química*, 119-128.
- Manzano-Aguilario, F., Montoya, F.G., Sabio-Ortega, A., García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **49**, 736-755.
- Marszal, A.J., Heiselberg, P., Bourrelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* **43**, 971-979.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté.
- Pratt A.W. (1981). *Heat transmission in Buildings*. New York: John Wiley and Richards L. M.
- Sachs, B., Hamilton, B., Clough, K., Alward, R. (1982). Non-Instrumented Performance Evaluation of Passive Solar Homes. *Passive Solar Journal* **1**, 2, 109-120.
- Sadineni, S.B., Madala, S., Boehm, R.F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**, 3617-3631.
- Schmidt, D. (2004). Design of low exergy buildings-method and a pre-design tool. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* **3**, 1-47.
- Schmidt, D. (2005). Designing low-“exergy” buildings. *Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries 2005*. Reykjavik: IBRI, 219-226.
- Sciubba, E., Wall, G. (2007). A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *Int. J. of Thermodynamics* **10**, 1, 1-26.
- Shukuya, M., Komuro, D. (1996). Exergy-entropy process of passive solar heating and global environmental systems. *Solar Energy* **58**, 1-3, 25-32.
- Shukuya, M., Hammache, A. (2002). Introduction to the concept of exergy for a better understanding of low-temperature heating and high-temperature cooling systems. *VVT research notes* **2158**, Espoo, 1-61.
- Shukuya, M. (2009). Exergy concept and its application to the built environment. *Building and Environment* **44**, 1545-1550.
- Shukuya, M. (2013). *Exergy: Theory and Applications in the Built Environment*. Londres: Springer-Verlag.
- Wang, L., Gwilliam, J., Jones, P. (2009). Case study of zero energy house design in UK. *Energy and Buildings* **41**, 1215-1222.