

ESCALAS DE LA ENERGÍA: LA EXERGÍA

Jaume Roset Calzada¹

jaime.roset@upc.es

<http://dfa.upc.es>

INTRODUCCIÓN

Creo que no descubro nada nuevo si afirmo que éste es un momento crucial para la humanidad. En efecto, todos los indicadores señalan que ya en la actualidad no podríamos soportar que los países más poblados del planeta aumentaran de forma significativa su consumo (ver, por ejemplo, El Estado del Mundo, 2004 del Worldwatch Institute). Mi sensación es que la destrucción del Medio Ambiente se realiza al ritmo de un bólido de fórmula 1 mientras que los que trabajamos para evitarlo nos movemos a pie y aún con dificultades.

La cuestión es, sin embargo, que no solamente somos muchos sino que estamos casi en todas partes del mundo y, actualmente y gracias al trabajo de multitud de asociaciones y personas, nos conocemos entre nosotros y estamos en contacto. De este conocimiento nace la posibilidad de realizar trabajos en conjunto que tienen en común, en mi opinión, su horizontalidad, es decir, la ausencia de una jerarquía previamente impuesta.

Evidentemente, las personas que creen en las jerarquías intentan mantenerlas defendiendo sus posiciones con argumentaciones variadas. Pienso, de todos modos, que el tiempo apremia y es necesario proceder a implementar rápidamente estos nuevos métodos de trabajo. Este trabajo quiere hacer una modesta aportación en este sentido.

La idea es proporcionar criterios objetivos para poder evaluar los consumos de materia y energías que aparecen en los problemas de sostenibilidad. Se trataría de intentar lograr una especie de guía para evaluar las transformaciones bien hechas.

La propuesta es potenciar la utilización de variables contrastables en la evaluación de proyectos científicos o tecnológicos así como en el seguimiento del funcionamiento real de sistemas (para una explicación clara de la teoría de sistemas ver Gonzalo, 1998)². La definición de variable contrastable es clara: "Una magnitud que valorada por distintos observadores da, prácticamente, el mismo resultado". Cualquier variable que puede ser rigurosamente medida o cualquier variable calculada mediante una secuencia de operaciones cumple estos requisitos.

Como físico, mi propuesta es utilizar las variables de la física para tal fin. En el momento de seleccionar una variable o conjunto de ellas me parece obligado tener en consideración a las personas a las que va dirigido el trabajo: arquitectos, ingenieros, licenciados y, cada vez más, no lo olvidemos, público en general.

Estas motivaciones me han llevado a reducir las variables a dos tipos: las geométricas y las energéticas. En el campo de la evaluación del medio ambiente se ha desarrollado con éxito el concepto de "huella ecológica" o "ecological footprint" (Wackernagel, 2001, 1996)³.

La idea de este trabajo sería iniciar el desarrollo para temas ambientales relacionados con la edificación de un

¹ Jaume Roset Calzada. Física Aplicada. ETSAB – UPC. Diagonal, 649. 08028 Barcelona. España. <http://dfa.upc.es>, T.+34.93.401.6380, jaime.roset@upc.es

² Gonzalo, G.E. "Manual de Arquitectura Bioclimática". Universidad de Tucumán, 1998

³ Wackernagel, M. "Our ecological footprint. Reducing human impact on the Earth". Gabriola Island New Society Publishers, 1996 (existe una traducción al español: Wackernagel, M. "Nuestra huella ecológica. Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra". Santiago de Chile LOM, 2001)

concepto parecido pero basado en las variables energéticas. Este concepto es el de Exergía, es decir, la energía aprovechable. Actualmente, se están realizando muchos trabajos sobre el tema. Me permito recomendarles el sitio web del Profesor Wall (web)⁴ como referencia prácticamente imprescindible.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma:

- Un repaso a las magnitudes energéticas y a sus diferentes formas de evaluación. Se hará especial hincapié en los usos relacionados con la edificación.
- La introducción del concepto de exergía.
- El cálculo de la exergía (incidiendo en los casos relacionados con edificación).

Como no puede ser de otra manera por mi trabajo de profesor, la presentación se hace de una forma académica y es, por lo tanto, necesariamente teórica. Espero de las personas que lean este trabajo las precisiones que ayuden a que no sea 'una teoría más de las muchas que pueblan los rincones de los archivadores de todo el mundo'.

Una vez preparados los oportunos algoritmos, el objetivo final sería – como está realizando el profesor De Dear (website)⁵ - instalarlos en un sitio web de libre disposición o en alguna revista de libre distribución...

MAGNITUDES ENERGÉTICAS Y FORMAS DE EVALUACIÓN.

La primera parte del proceso de enseñanza se realiza mediante un tema, al que he titulado Escalas de la Energía (este material está disponible en el apartado de docencia del departamento de Física Aplicada) en el cual se procede a:

- Repasar los conceptos de energía, trabajo y potencia, así como otras magnitudes derivadas de ellas.
- Tabular los valores de diferentes energías de interés (con especial hincapié en los usos relacionados con la edificación).
- Proponer y explicar alguna de las formas de calcular estas energías o potencias u otras magnitudes. En este caso, la aclaración de la nomenclatura es imprescindible. Se trata, como bien saben todos ustedes, de un proceso sumamente tedioso pero entiendo que es absolutamente crucial ser capaz de comprender el contenido que se esconde en los símbolos que aparecen en las fórmulas.
- Tabular y utilizar las diferentes unidades que aparecen cuando se estudian temas energéticos (temp, caloría, CV, HP...). Como en el apartado anterior, el proceso se convierte en duro para algunas de las personas a las que va dirigido pero es, repito, absolutamente crucial.
- Las conversiones entre tipos de energías, insistiendo especialmente en que el sentido de estas transformaciones cuenta y mucho en los rendimientos finales de las mismas. Se presenta una tabla con los valores de los rendimientos más usuales y se comentan las implicaciones teóricas (y de todo tipo) que el Segundo Principio de la Termodinámica proporciona.

Al finalizar el tema, los alumnos debieran ser capaces de seguir las informaciones de prensa sobre temas energéticos y de realizar, por sí mismos, algunos pequeños cálculos de órdenes de magnitud (ver, por ejemplo, Isalgué1995)⁶.

Sin embargo, este tema deja en el aire la posibilidad de hacer estimaciones sobre las diferentes formas de materia y sus posibilidades de transformación. De alguna manera, nos es necesario definir algún criterio que nos informe sobre lo más o menos "útil" para el ser humano que es una materia en un determinado estado. Creo, en este sentido, que la magnitud Exergía es especialmente adecuada.

LA INTRODUCCIÓN DEL CONCEPTO DE EXERGÍA.

⁴ Wall, G. <http://exergy.se>

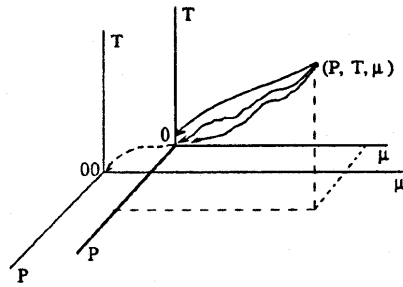
⁵ Dear, R. <http://atmos.es.mq.edu.au/~rdedear/pmv/>

⁶ Isalgué, A. "L'energia viatja als edificis". Edicions UPC, 1995

La magnitud Exergía se define como la medida del máximo trabajo que se puede extraer cuando un sistema va hacia el equilibrio termodinámico con un estado de referencia. Alternativamente, sería la medida del mínimo trabajo que hay que dar a un sistema para obligarlo a pasar a un estado predeterminado (Wall, web)⁷. Utilizando los recursos de la termodinámica se puede ver (Wall, web)⁸ que el cálculo de este trabajo es, a grandes rasgos, la consecuencia de sumar:

- La concepción habitual de trabajo con una presión P y unos cambios en el volumen V.
- El calor efectivamente utilizable y referenciado por la temperatura T y unos cambios en la entropía S.
- La energía intercambiada cuando unas sustancias químicas se convierten en otras. Para cada sustancia la referencia es su potencial químico μ y los cambios son en las concentraciones N.

La siguiente gráfica, tomada de los trabajos de libre disposición de Valero y Guallar (web)⁹, es en mi opinión la que de una forma más clara refleja la idea que quiero transmitir:



Entonces, la exergía X se introduce como una función de estado (es decir, depende solamente del estado inicial y del final, no del camino intermedio) que cuando las variables S, V y N_i (las variables extensivas –en jerga termodinámica-) están fijas. Se puede calcular mediante la fórmula:

$$X = (T - T_{00})S - (p - p_{00})V + \sum_{i=1}^r (\mu_i - \mu_{00,i})N_i$$

⁷ Wall, G. <http://exergy.se>

⁸ Wall, G. <http://exergy.se>

⁹ Valero, A, Guallar, J. "On processable energy: A rigorous approach". <http://circe.cps.unizar.es>

En otras ocasiones son T, p y μ (las variables intensivas –en jerga termodinámica-) las que están fijas y se necesita para el cálculo realizar una cierta evaluación de la energía interna U, la fórmula es entonces:

$$X = (U - U_{00}) - T_{00}(S - S_{00}) + p_{00}(V - V_{00}) + \sum_{i=1}^r \mu_{00,i}(N_i - N_{00,i})$$

A estas alturas del trabajo la tremenda importancia de insistir a las personas sobre la nomenclatura y los cálculos que mencionaba antes se hace, creo, evidente.

A continuación, pueden encontrar, en dos tablas separadas algunos valores de exergía energética y másica en forma de índice de calidad (porcentaje de exergía). En la tabla I se muestra una medida de la capacidad que tiene un tipo de energía de transformarse en otro tipo de energía. La tabla II se muestra lo mismo para las transformaciones de un tipo de masa en otro.

	Forma de Energía	Índice de calidad (porcentaje de exergía)
Extra superior	Energía potencial (1)	100
	Energía cinética (2)	100
	Energía eléctrica	100
Superior	Energía nuclear (3)	Casi 100
	Luz del Sol	95
	Energía química (4)	95
	Vapor caliente 'District heating'	60
Inferior	Calor residual	5
Sin valor	Radiación desde el suelo	0

(1) Recursos de agua en altura

(2) Cascadas

(3) Energía en el combustible nuclear

(4) Petróleo, carbón, gas o turba

Tabla I 'The quality of different forms of energy' (extraída de Wall, web)¹⁰

Forma de materia	Índice de calidad (porcentaje de exergía)
Materia en forma ordenada (1)	100
Materia como bienes comerciales (2)	Casi 100
Mezclas de elementos (3)	Aproximadamente 90
Depósitos ricos de mineral (4)	50 - 80
Ganga aproximadamente	50
Depósitos pobres de mineral (5)	20-50
Mineral disuelto en agua de mar o en tierra	Aproximadamente 0

¹⁰ Wall, G. <http://exergy.se>

- (1) Carbón en forma de diamante
- (2) Hierro, oro o plomo
- (3) Acero, aleaciones o plásticos
- (4) Bog iron –limonite-
- (5) Bauxita

Tabla II. ‘The quality of different materials i.e. forms of matter’ (extraída de Wall, web)¹¹

Los resultados tabulados son, naturalmente, aproximaciones. Si se desea conocer con precisión los valores es necesario realizar cálculos de procesos los cuales intenten reproducir, cada vez con mayor detalle, lo que está ocurriendo.

El excelente libro editado por Naredo y Valero (1999)¹² es imprescindible para continuar en este proceso ya que, en él, se dan las claves para la definición precisa de estos procesos; una cuestión clave para poder comparar los resultados que se obtienen.

EL CÁLCULO DE LA EXERGÍA (INCIDIENDO EN LOS CASOS RELACIONADOS CON EDIFICACIÓN)

Como ya se ha comentado, podemos identificar los términos referidos a:

- Procesos impulsados por el cambio de temperatura distinguiendo si es en el sentido deseado o no. Por ejemplo, el calor generado por una bombilla en el proceso de transformación de energía eléctrica en luz es positivo si deseamos más calor en el lugar donde está situada y negativo en caso contrario.
- El trabajo en su sentido más clásico.
- Las variaciones de la cantidad de las diferentes especies químicas.

Teniendo en cuenta los posibles cambios en la facilidad o dificultad para incorporar (o extraer) una especie química en un cierto entorno. Por ejemplo, serviría para estimar la energía mínima necesaria para desalar el agua que se ensucia en una ciudad o en un sector de ella.

Vamos a proceder a indicar los tres cálculos por separado:

¹¹ Wall, G. <http://exergy.se>

¹² Naredo, J.M., Valero, A. (dirs.) “Desarrollo económico y deterioro ecológico”. Fundación Argentaria – Visor. Dis, 1999

a) Calor

$$X = T\Delta S$$

Se trata de calcular DS a partir de la integración de:

$$dS = \frac{dQ_R}{T}$$

Como factores que, normalmente aparecen están:

- El caso de la combustión: Viene expresado por el calor mínimo de combustión qc (expresado en J/kg por ejemplo) a una temperatura de combustión TC y con una temperatura externa TE qc es un término técnico pero que se encuentra tabulado.

$$X = T_E \left(\frac{mq_C}{T_E} - \frac{mq_C}{T_C} \right)$$

- La cantidad de calor que hay que ir suministrar para provocar el cambio de temperatura de un cierto fluido:

Así, para calentar una masa m (kg) de fluido con calor específico c entre Tbaja y Talta se necesita aumentar el calor sensible en mcDT y se produce un cambio de exergía de:

$$X = T_{ref} mc \ln \left(\frac{T_{alta}}{T_{baja}} \right)$$

donde Tref sería normalmente la Tbaja

b) Trabajo

El cálculo del trabajo se haría de la forma clásica: Trabajo = Energía suministrada - Pérdidas

Para cada tipo de proceso puede haber pérdidas diferentes, por ejemplo, la electricidad tiene pocas pérdidas en el edificio ¡pero pueden llegar a ser enormes según cómo se repercute su generación y transporte!

c) Cambio químico:

Las dos utilizaciones más usuales son para limpiezas o para la combustión. Es decir, por un lado, la posibilidad de limpiar el agua ensuciada o el aire de la ciudad o,

por otro lado, de estudiar los productos de una combustión (por ejemplo CO₂ o CO o aún otros potencialmente más dañinos

$$X = \sum(\mu_i - \mu_{00i})n_i$$

El potencial químico se acostumbra tomar a partir de una referencia (mi0 a cierta T0) y la concentración real ci modifica el cálculo según:

$$\mu_i = \mu_{i0} + RT_0 \ln(c_i)$$

Los valores de referencia comúnmente aceptados son los debidos a Szargut que se pueden encontrar en Wall (web)³

El dar valores numéricos a las magnitudes que aparecen en los anteriores desarrollos nos proporciona la herramienta adecuada para poder comparar los términos que implican los diferentes procesos a estudiar.

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

A manera de conclusiones de mi trabajo me gustaría haber hecho una aportación a las posibilidades de evaluación de los procesos de transformaciones de energías y de masas. Procesos fundamentales para la vida de las personas individualmente y la supervivencia de la propia biosfera de nuestro planeta.

He concentrado mi aportación en la explicación de una variable energética. Su nombre es Exergía y pretende proponernos unos límites con los que seamos capaces de evaluar los procesos reales que efectuamos (o planeamos efectuar).

Pienso que el planteamiento que presento (siguiendo la línea apuntada en Roset et al.,1999)¹³ puede tener éxito a condición de disponer de unos docentes y unos discentes suficientemente motivados para afrontar unas rutinas de cálculo que son, como mínimo, tediosas. Por ello, he incluido en el artículo las fórmulas básicas para que las personas que lo deseen puedan ir ejercitándose.

En cuanto a los desarrollos a presentar en un futuro me gustaría separarlos entre los

¹³ Roset, J. , Marincic, I., Ochoa, J.M. "Escalas de la Física. Una asignatura". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol.3, N°2, 1999.

que ya están en curso y los que serán, al menos para mí, posteriores:

- *Desarrollos en curso:*

Mejorar el sistema de transmisión de conocimientos: La experiencia de la asignatura Física del Medio Ambiente en Arquitectura (que se puede consultar en el sitio web del Departament de Física Aplicada) puede servir para intentar que todos los temas se puedan explicar de formas más 'amigables' para la persona interesada. Este es el trabajo objeto de la tesis doctoral que estoy desarrollando.

- *Otros desarrollos en Arquitectura* (la titulación incluye, en España, el estudio del Urbanismo):

Pensar en niveles de detalle sucesivos diversos casos típicos. Documentarlos abundantemente con información gráfica y de cálculo.

Preparación de algoritmos robustos (desde el punto de vista de las Matemáticas) de cálculo

Trabajar en la definición de formas comunes de medir adecuadamente las variables implicadas en los cálculos de exergía (por ejemplo, ya parecen ser aceptadas las tablas de Szargut¹⁴ como referencia para los cálculos con cambio de especies químicas).

Finalmente, es fundamental la implementación informática tanto que se pueda disponer de la información (en webs como la de Wall)¹⁵ como de las propias herramientas de cálculo. Para las herramientas de cálculo dos son las posibilidades complementarias:

- En una hoja de cálculo de uso común (compatible MS-Excel, como ha hecho Gonzalo,1998 por ejemplo)
- En una web a distancia (como en la web de De Dear)

REFERENCIAS

De Dear, R.
<http://atmos.es.mq.edu.au/~rdedear/pmv/>

¹⁴ Wall, G. <http://exergy.se>

¹⁵ Wall, G. <http://exergy.se>

Gonzalo, G.E. "Manual de Arquitectura Bioclimática". Universidad de Tucumán, 1998

Isalgué, A. "L'energia viatja als edificis". Edicions UPC, 1995

Naredo, J.M, Valero, A. (dirs.) "Desarrollo económico y deterioro ecológico". Fundación Argentaria – Visor. Dis, 1999

Roset, J., Marincic, I., Ochoa, J.M. "Escalas de la Física. Una asignatura". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol.3, Nº2, 1999.

Valero, A, Guallar, J. "On processable energy: A rigorous approach". <http://circe.cps.unizar.es>

Wackernagel, M. "Our ecological footprint. Reducing human impact on the Earth". Gabriola Island New Society Publishers, 1996 (existe una traducción al español:

Wackernagel, M. "Nuestra huella ecológica. Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra". Santiago de Chile LOM, 2001)

Wall, G. <http://exergy.se>

Copyright 2004. Número de Registro B-30620-2003. Ide@Sostenible. Derechos reservados. Cualquier impresión, publicación en WWW u otro medio, así como su distribución electrónica y/o comercial requiere autorización del Consejo Editorial. El contenido de los artículos es responsabilidad del autor.