

Representación gráfica de la exergía

*Jaume Roset Calzada **, *Jonathan López Skoog*

Departamento de Física Aplicada ETSAB (UPC), con una ayuda del Laboratorio Real II
jaime.roset@upc.edu

Introducción

El creciente interés que despiertan en sectores cada vez más grandes de población los temas medioambientales hace que tenga sentido plantearse el como presentar estos temas a un público no especializado.

Los temas medioambientales son complejos y requieren, por tanto, un trabajo previo de preparación. Además, una cantidad significativa de información se obtiene constantemente. La cuestión es como hacer compatibles la evaluación rigurosa de los temas (con unos esquemas de cálculo relativamente complicados) con una presentación que comprenda los resultados de esta evaluación.

Para tomar de referencia una de las evaluaciones, la que se refiere a la energía útil que se va perdiendo en un proceso tanto de aprovechamiento de calor, como de realización de trabajo, como de cambio de estado químico de las sustancias, hemos elegido la variable exergía.

La variable exergía nos indica la máxima cantidad de energía útil que podemos obtener en un proceso dado.

La comparación entre diferentes procesos viene dada de forma natural por cocientes de exergías.

En un trabajo anterior¹ (ver Ide@Sostenible, número 7) hemos explicado las bases teóricas para el cálculo de la exergía.

En el presente trabajo nos concentraremos en la presentación de los resultados. Hemos probado una representación gráfica en colores para transmitirlo al público en general.

Recordemos que la exergía es una medida en unidades energéticas de la energía útil. Puede ser utilizada para calcular cualquier tipo de proceso. A grandes rasgos, estos procesos se pueden dividir en térmicos, de trabajo realizado y de transformación de materiales.

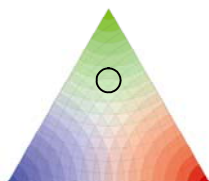
El desarrollo concreto

En este trabajo representaremos la exergía con la letra X mayúscula. Llamaremos exergía roja a la relacionada con los procesos térmicos. De igual forma será exergía verde (o green exergy, G-Exergy, X_G) la relacionada con procesos de realización de trabajo y será exergía azul (o blue exergy, B-Exergy, X_B) la que tenga que ver con transformaciones de materiales.

Para la representación gráfica, hemos comenzado por estudiar los diagramas RGB que se utilizan para temas de color².

La propuesta se basa en evaluar los diferentes procesos sobre una base normalizada y representarlos en una transformación del diagrama RGB.

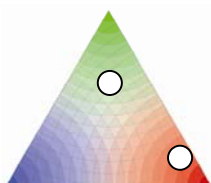
Se trata de un triángulo equilátero con tres vértices, correspondientes a un uso 'perfecto' de la energía térmica, del trabajo y de los materiales. Medido sobre las medianas podemos tener, entonces, una idea de la bondad del proceso.



En la figura se muestra el caso de un proceso de trabajo (exergía verde) hecho con un 25% aproximadamente de rendimiento.

Esta representación es suficiente en casos en que sólo hay la posibilidad de un tipo de proceso (R, G o B).

Para los casos combinados (RG, GB, BR i RGB) se pondrán tantos círculos como sea necesario. En estos casos se podrá representar el valor global sobre el triángulo rectángulo clásico de la representación del color. Entenderemos como valor global un valor ponderado de las diferentes acciones.



Por ejemplo, en el triángulo equilátero de la figura se representa el caso de un proceso realizado con unos rendimientos aproximados de un 25% para el trabajo y un 70% para el calor útil.



El triángulo rectángulo nos representa una media aritmética de las dos acciones. Quiero señalar que este promedio se puede hacer a voluntad de la persona que está realizando el cálculo, siendo la media aritmética una de las opciones posibles.

A continuación vemos el valor que resultaría si consideramos que el efecto del trabajo nos supone un 75% y el efecto del calor útil únicamente un 25%



Donde se aprecia que el efecto conjunto se acerca a la zona blanca que representa un bajo nivel de aprovechamiento general.

Aplicaciones

Las aplicaciones que se presentan a continuación se pueden consultar más en detalle en el Informe Final del grupo de Laboratorio REAL II de la UPC³

Hemos presentado un ejemplo para cada uno de los casos posibles de combinación. Es decir:

- tres casos con un único tipo de proceso (calor útil –R-, de trabajo –G- o de transformación positiva de materiales –B-)
- tres casos de combinaciones por parejas de procesos (calor útil y trabajo –RG-, calor útil con transformación de materiales –BR y trabajo combinado con transformación positiva de materiales –GB-)

- un caso de proceso que los engloba a los tres (RGB).

Los casos concretos discutidos han sido:

- **R** Necesidades de calefacción cubiertas por combustión.
- **G** Iluminación mediante lámparas fluorescentes.
- **B** Papel y su reciclaje.
- **RG** Iluminación y calor deseado mediante lámparas fluorescentes.
- **BR** Discusión de relaciones agua fría/caliente y circuito abierto/cerrado.
- **GB** Rendimiento energético y aprovechamiento de material.
- **RGB** Calor útil, rendimiento energético y aprovechamiento de material.

En cada ficha, podemos observar: En la parte superior izquierda, la letra que identifica el tipo de proceso. En la parte superior derecha, el resultado gráfico obtenido.

A continuación se presenta una breve descripción de cómo se ha llegado a los valores de los diferentes rendimientos individuales que incluye:

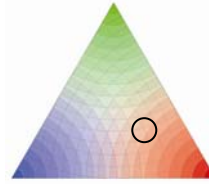
- La descripción verbal del proceso que se realiza y de cual sería el proceso ideal.
- Un resumen de los datos utilizados en el propio trabajo
- El cálculo o la estimación que, concretamente, se han realizado. Al final de esta parte aparece, en negrita, el tipo de exergía y el valor obtenido para ella (corresponde al gráfico de la parte superior de la ficha).

En este trabajo, hemos considerado todos los valores a representar sobre los triángulos rectángulos calculados como medianas directas de los valores correspondientes a los procesos por separado.

- Una breve discusión sobre la bondad de los valores obtenidos.
- Unas 'conclusiones' que pretenden, sobre todo, informar de que nuevos trabajos habría que realizar a continuación.

Presentamos, a continuación, las fichas de 7 procesos como ejemplo. En principio, las fichas están pensadas para ocupar un DIN A-4. Las hemos reducido un poco a fin de limitar la extensión del artículo.

R



Descripción: Los cálculos de las necesidades de calefacción y la exergía derivada. Los cálculos de la exergía derivada de la combustión. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos:

	Ki (W/m ² °C)	Si (m ²)
Cerramiento opaco	1,01	1653,60
Cerramiento aperturas cubierta	2,60	2101,40
Forjado con terreno	0,29	981,25
	0,24	1406,25

Cálculo/estimación:

Ktotal;

$$K = \frac{\sum Ki \cdot Si}{S} = 1,26 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Cg = Cd + Cv = K \frac{S}{V} + n \cdot 0,35 = 3,048 \frac{W}{m^3 \cdot ^\circ C}$$

$$E = Cg \cdot V \cdot GG \cdot \tau = 57092850W$$

$$\text{Exergía necesaria} = E(1 - T_{\text{ext}}/T_{\text{room}}) = 337 \cdot 10^9 J$$

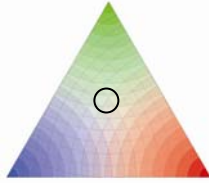
Exergía derivada de la combustión;
 $E_{\text{fin}} = E_m(1 - T_{\text{ext}}/T_{\text{comb}}) = 29847229$
 $J/Kg \cdot 10^5 \text{ Kg} = 2,98 \cdot 10^{12} J = 2984 \cdot 10^9 J$

R: 11%

Discusión: Este valor lo hemos comparado con otros de la bibliografía obteniendo un resultado semejante.

Conclusiones: Se pierde mucha energía destinada a calentar viviendas. Una parte de ésta, probablemente, es el origen de las islas de calor de las ciudades.

G



Descripción: Los cálculos de la energía lumínica que se proyecta proveer en relación a la energía eléctrica suministrada para obtenerla. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos: Se prevén dos tipos de fluorescentes para todo el edificio:

1. Marca OSRAM; Modelo L 65W/..Sa, de Ø38mm y longitud 1500mm
2. Marca OSRAM; Modelo L 16W/.., de Ø26mm y longitud 720mm

Medidas:

	L65W/..Sa	L16W/..
TOTAL	482 uts	257 uts

Cálculo/ estimación:

Una lámpara fluorescente convierte una energía de origen eléctrico en una energía final radiante, con un rendimiento estándar del 20%

G: 20%

Discusión:

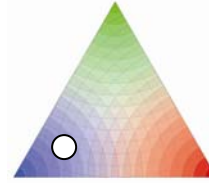
Este valor es muy discutible ya que tan sólo vemos si estamos en contacto visual con la acción de la lámpara.

Conclusiones:

Es necesario un importante trabajo de análisis para esclarecer, desde el punto de vista de la exergía (es decir, en definitiva, de la utilidad) el papel de la iluminación artificial tanto relativo al consumo de electricidad que aquí es (prácticamente) obligado como a su desperdicio (lo que se denomina contaminación lumínica).



B



Descripción: Los cálculos de la energía para producir papel y una estimación del agua a ensuciar. Si hay reciclaje, una estimación de la energía y el agua a ensuciar. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos: Para cada Tm

7500 kwh=7500 kwh·3,6·10⁶ J/kwh=27·10⁹ J (+40000 l. H₂O)

En nuestro caso.-

- En España 158 Kg papel/año y persona
- Según CPI, las oficinas tienen una ocupación de una persona cada 10 m², por tanto, 7751,45m²·1persona/10 m²= 775 personas

Cálculo/estimación:

Cp=(158 Kg/año·persona)·775 personas =122450Kg/año=122,45 tm papel/año

Consumo de energía E=27·10⁹ J/tm·122,45 tm/año= 3306150·10⁶J

Consumo de energía como reciclaje se reduce el 50 %= 1653075·10⁶J

Con una buena tecnología disponible, se puede conseguir un ahorro de agua del 47% (www.ideal.es/waste)

B: 47%

Discusión:

Los cálculos con agua no tienen una única definición. En efecto, pensemos que el agua es un bien preciadísimo en ciertas situaciones, por ejemplo este año de sequía o, aun peor, para las millones de personas que la poseen y la superabundancia en otros lugares.

Conclusiones:

Pensemos que la valoración de la fórmula

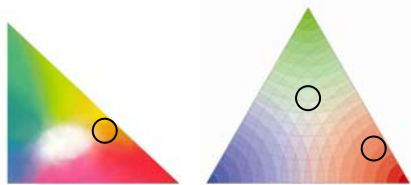
$$X_B = \sum_j \mu_j \cdot \Delta N_j$$

está estableciendo un problema para los cálculos de la exergía. La dificultad más grande aparece del hecho de disponer de un amenera



ágil de los valores tabulados de los potenciales químicos μ en diferentes referencias (las estándar son debidas a Szargut).

RG



Descripción: Los cálculos de la energía lumínica y calorífica que se proyecta suministrar en relación a la energía eléctrica suministrada para obtenerla. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos: Al igual que en el caso R, se preveen dos tipos de fluorecentes para todo el edificio:

1. Marca OSRAM; Modelo L 65W/..Sa, de $\varnothing 38\text{mm}$ y longitud 1500mm
2. Marca OSRAM; Modelo L 16W/.., de $\varnothing 26\text{mm}$ y longitud 720mm

Medidas:

	L65W/..Sa	L16W/..
TOTAL	482 uts	257 uts

Cálculo/estimación:

Una lámpara fluorescente convierte una energía de origen eléctrica en una radiante y otra que desprende calor. Tienen un rendimiento estandar del 20%; el 80% restante se puede suponer que se convierte en calor. Para el caso de invierno supondremos que no existe ningun aotra pérdida.

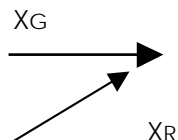
G: 20% , R: 80%

Discusión:

Hemos comentado que pasaría con una lámpara incandescente que emitiese según la Ley de Planck. Hemos separado los valores en el campo visual y fuera de él.

Conclusiones:

Lo que nos preocupa es, sin embargo, lo que se muestra en el dibujo adjunto. Es decir, la imposibilidad, creemos, de considerar una suma directa entre la componente de rendimiento de trabajo (G) y la componente de rendimiento térmico (R). Pensamos, por ejemplo,



que en un caso de invierno, el calor que suministramos a las bombas (y es bastante) va en el buen sentido. En un caso de verano, sin embargo, se ha de clasificar indudablemente como negativa!!

BR



Descripción: Las necesidades de agua caliente y fría sanitaria. Los cálculos de la energía para producir ACS y calefacción. Los acumuladores. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos: Elección de la caldera según las necesidades de ACS y calefacción para un edificio colectivo de 24 viviendas de 80 m² (la costumbre es realizar éstos cálculos en litros / hora que es una unidad mucho más operativa que la unidad SI metros cúbicos/segundo, como consecuencia del resultado se presenta en kcal/h, 1 kcal/h = 1,16 watt)

1. Consumo ACS horario punta;
 $C_h=1837,44 \text{ l/h a } 45^\circ\text{C}$
2. Potencia:
 - para ACS $P_{c1}= 64.310,4 \text{ Kcal/h}$
 - para calefacción $P_{c2}=116.697,6 \text{ Kcal/h (estimación)}$

TOTAL

$P_c= 181.008 \text{ Kcal/h (} 2 \times 100000 \text{ Kcal/h)}$

3. Consumo diario acumulador
 $C_a= 3674,88 \text{ l (} 2 \times 2000 \text{)}$

Cálculo/estimación:

Tendrá dos partes:

- Para el apartado R podríamos tomar un rendimiento exregético de aproximadamente un **30%**
- Par ae lapartado B estamos en el caso en que no podemos atribuir al consumo de agua 'limpia' unos valores precisos ya que el agua es muy valiosa en algunos lugares y muy poco en otros del mundo donde es muy abundante. Representaremos un punto del **20%** ya que la mayor parte que calentamos no la volvemos a utilizar.

R:30%, B: 20%

Discusión:

Como ya hemos señalado en la ficha B, los cálculos con agua son siempre de difícil definición. Nos gustaría insistir, sin embargo, en que es absolutamente fundamental realizarlos.

Conclusiones:

Los cálculos de exregía que combinan procesos de gasto de agua con procesos energéticos requerirían una investigación prioritaria.

GB



Descripción: Los cálculos de la energía eléctrica de uso del ordenador y de las masas (cualificables energéticamente) para producirlo. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos: Estimación de uso y consumo por semana. Dos casos: viviendas y oficinas.

1 vivienda	5h	300W	1,5 kWh
	10h		3,0 kWh
	20h		6,0 kWh
1 oficina	40h		12,0 kWh

Energía consumida (1 semana de uso = 40 horas en la oficina)

Consumo real del ordenador: medidas realizadas con Energy Monitor 3000

ordenador	0,1145 kWh/h	4,58 kWh
monitor	0,0557 kWh/h	2,23 kWh

Cálculo/estimación:

Para la parte G, aprovechamos 4,58+2,23 = 6,81 kWh de los 12 kWh nominales, es decir, una proporción del **57%**. Para la parte B, como hemos discutido anteriormente, es difícil realizar estimaciones. A efectos de representación, le asignaremos un valor claramente desfavorable (un **10%**) para resaltar el hecho de que la problemática relacionada con la eliminación de residuos informáticos será cada vez más importante.

G: 57%, B: 10%

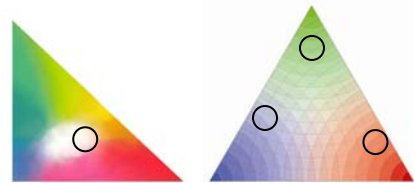
Discusión:

El cálculo de la parte G se podría afinar aplicando, como se hace con los electrodomésticos, unas categorías para el consumo de los diferentes ordenadores. Par al aparte B, queda aún un necesario esfuerzo en la definición precisa de los cálculos a realizar.

Conclusiones:

Como ya hemos señalado repetidamente, la 'puesta en común' de los cálculos energéticos con los de los materiales se revela como la clave.

RGB



Descripción: Los cálculos del calor bueno que se añadiría a la energía eléctrica de uso del ordenador y de las masas (cualificables energéticamente) para producirlo. La representación gráfica propiamente dicha.

Datos: (los mismos anteriores)

Datos extraídos de <http://elmundo.es>

1 micro-procesador	32 l H ₂ O
	1,6 kg Petróleo
	700g CO ₂
	72g Sust. Químicas nocivas

Cálculo/estimación:

Para la parte G, aprovechamos 4,58+2,23 = 6,81 kWh de los 12 kWh nominales, es decir, una proporción del **57%**. Para la parte R, podemos asignar –en condiciones de invierno- un alto aprovechamiento ya que es una energía que nos aparece, (no más del **80%**, resulta del propio calentamiento de los elementos internos del ordenador es a la larga, negativo). Para la parte B, mantendremos el **10%** anterior.

R: 80%, G:57%, B:57%

Discusión:

Es importante valorar que, en condiciones de verano NO existe esta parte R positiva.

Conclusiones:

Todos los fenómenos son en realidad RGB. De hecho, los estudios parciales se hacen siempre intentando comprenderlos mejor!!



Conclusiones

La opinión de las personas que vean nuestra representación gráfica es la que en definitiva decidirá si nuestro trabajo ha tenido el impacto que pretendíamos. Nosotros creemos haber demostrado la coherencia de los cálculos.

El proceso de desarrollo del proyecto global de evaluación y representación de la exergía nos ha llevado a plantear posibles extensiones del mismo:

- 1) Preparar en un soporte del tipo hojas de cálculo (MS-Excel, por ejemplo) algoritmos 'robustos' para calcular los tres tipos de exergía en diferentes situaciones.
- 2) Preparar los algoritmos de la parte 1 para introducir datos exteriores.

Impulsar las medidas rápidas realizadas por los propios usuarios.

- 3) Poner estos algoritmos en soporte informático de manera que puedan ser ejecutables desde ordenadores remotos.

Esperamos con este trabajo incrementar la difusión de los buenos cálculos tanto a nivel de nuestra universidad como a nivel internacional.

¹Escalas de la energía: la exergía
Jaume Roset Calzada
Ide@sostenible, año 2, 2. Páginas 7 a 12. 1
Noviembre (2004)
Depósito Legal. B-30620-2003;
www.ideasostenible.org

²Física de la Llum i el so (capítol 5.5) Antoni Isalgué Buxeda. Edicions UPC, 1995

³"Informe Final del grup Representació gràfica de l'Exergia pel Laboratori Real II"
Jaume Roset Calzada. CITIES-UPC. Juliol 2005 (institución que ha financiado el trabajo) .

Copyright 2006. Número de Registre B-30620-2003. Ide@Sostenible. Drets reservats. Qualsevol impressió, publicació en WWW u altre medi, així com la seva distribució electrònica i/o comercial requereix autorització del Consell Editorial. El contingut dels articles és responsabilitat de l'autor.