

## Representació grafica de l'exergía

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

Departament de Física Aplicada ETSAB (UPC), amb un ajut del Laboratori Real II  
jaime.roset@upc.edu

### Introducció

El creixent interès que desperten en capes cada cop més grans de la població els temes de Medi Ambient fa que calgui plantejar-se com presentar aquests temes a un públic no especialitzat.

Els temes de Medi Ambient són complexes i requereixen, per tant, un treball previ de preparació.

A més, una quantitat significativa d'informació s'està obtenint constantment.

La qüestió és com fer compatibles l'avaluació rigorosa dels temes (amb uns esquemes de càlcul relativament complicats) amb una presentació entenedora dels resultats d'aquesta avaluació.

Per a fer una part de les avaluacions, la que fa referència a l'energia útil que es va perdent en un procés tant d'aprofitament de calor, com de fer treball, com de canviar l'estat químic de les substàncies hem triat la variable exergía.

La variable exergía ens indica la màxima quantitat d'energia útil que podem obtenir en un procés donat. La comparació entre diferents processos ve donada de forma natural per quocients d'exergies

En un treball anterior<sup>1</sup> (veure [Ide@Sostenible](#), número 7) vam explicar les bases teòriques pel càlcul de l'exergía.

En el present treball ens concentrarem en la presentació dels resultats. Hem triat una representació gràfica en colors per a transmetre-la al públic en general.

Recordem que l'exergía és una mesura en unitats energètiques de l'energia útil. Pot ésser utilitzada per a calcular qualsevol tipus de procés. A grans trets, aquests processos es poden dividir en tèrmics, de treball realitzat i de transformació de materials.

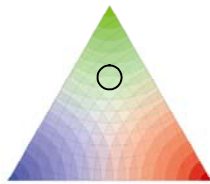
## El desenvolupament concret

En aquest treball representarem l'exergia amb la lletra X majúscula. Anomenarem exergia vermella (o red exergy, R-Exergy,  $X_R$ ) a la relacionada amb els processos tèrmics. De la mateixa manera serà exergia verda (o green exergy, G-Exergy,  $X_G$ ) la relacionada amb processos de realització de treball i serà exergia blava (o blue exergy, B-Exergy,  $X_B$ ) la que tingui a veure amb transformacions de materials.

Per a la representació gràfica, hem començat per estudiar els diagrames RGB que s'utilitzen per a temes de color<sup>2</sup>.

La proposta es basa en avaluar els diferents processos sobre una base normalitzada i representar-los en una transformació del diagrama RGB.

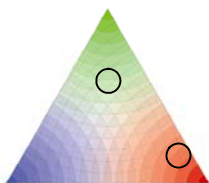
Es tracta d'un triangle equilàter amb tres vèrtex, corresponents a un ús "perfecte" de l'energia tèrmica, del treball i dels materials. Mesurant sobre les mitjanes hom pot tenir, aleshores, la idea de la bondat del nostre procés.



En la figura es mostra el cas d'un procés de treball (exergia verda) fet amb un 25% - aproximadament- de rendiment.

Aquesta representació és suficient en casos en què no més hi ha la possibilitat d'un tipus de procés (R, G o B).

Pels casos combinats (RG, GB, BR i RGB) es posaran tants cercles com sigui necessari. En aquests casos hom podrà representar el valor global sobre el triangle rectangle clàssic de la representació de color. Entendrem com a valor global un valor ponderat de les diferents accions. Per exemple,



En el triangle equilàter de la figura, es veu el cas d'un procés fet amb uns rendiments

aproximatats d'un 25% pel treball i un 70% per a la calor útil.



El triangle rectangle ens representa una mitjana aritmètica de les dues accions. Vull assenyalar que aquest promig es pot fer a voluntat de la persona que està realitzant el càlcul, essent la mitjana aritmètica una de les opcions possibles.

A continuació veiem el valor que resultaria si considerem que l'efecte del treball ens importa un 75% i l'efecte de la calor útil, únicament un 25%



On es veu que el procés conjunt trepitja la zona blanca que representa un baix nivell general d'aprofitament.

## Aplicacions

Les aplicacions que presentem a continuació es poden veure amb més detall en l'Informe Final del grup pel Laboratori REAL II de la UPC<sup>3</sup>

Hem presentat un exemple per cadascun dels set casos possibles de combinació. És dir:

- tres casos amb un únic tipus de procés (calor útil –R-, de treball –G- o de transformació positiva de materials –B-)
- tres casos de combinacions per parelles de processos (calor útil i treball –RG-, calor útil amb transformació de materials –BR i treball combinat amb transformació positiva de materials –GB-)
- un cas de procés que els engloba els tres (RGB).

Els casos concrets discutits han estat:

- R** Necessitats de calefacció cobertes per combustió.
- G** Il·luminació mitjançant làmpades fluorescents.
- B** Paper i el seu reciclatge.
- RG** Il·luminació i calor desitjada mitjançant làmpades fluorescents.
- BR** Discussió de relacions aigua freda/calenta i circuit obert/ tancat.
- GB** Rendiment energètic i aprofitament de material.
- RGB** Calor útil i rendiment energètic i aprofitament de material.

En cada fitxa, hom pot veure: En la part superior esquerra, la lletra que identifica el tipus de procés. En la part superior dreta, el resultat gràfic obtingut.

A continuació hi ha una breu descripció de com s'ha arribat als valors dels diferents rendiments individuals que inclou:

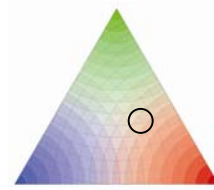
- La descripció verbal del procés que es realitza i de quin seria el procés ideal.
- Un resum de les dades utilitzades en el propi treball
- El càlcul o l'estimació que, concretament, s'han realitzat. Al final d'aquesta part hi ha, en negreta, el tipus d'exergia i el valor obtingut per a ella (correspon al gràfic de la part superior de la fitxa).

En aquest treball, hem considerat tots els valors a representar sobre els triangles rectangles calculats com a mitjanes directes dels valors corresponents als processos per separat.

- Una breu discussió sobre la bondat dels valors obtinguts.
- Unes 'conclusions' que pretenen, sobre tot, informar de quins nous treballs caldria fer a continuació.

Presentem, a continuació, les fitxes de 7 processos com a exemple. En principi, les fitxes estan pensades per a ocupar un DIN A-4. Les hem reduïdes una mica a fi de limitar l'extensió de l'articles

**R**



Descripció: Els càlculs de les necessitats de calefacció i l'exergia que s'en deriva. Els càlculs de l'exergia que es deriva de la combustió. La representació gràfica pròpiament dita.

Dades:

	Ki (W/m <sup>2</sup> °C)	Si (m <sup>2</sup> )
Tancament opac	1,01	1653,60
Tancament obertures	2,60	2101,40
Coberta	0,29	981,25
Forjat amb terreny	0,24	1406,25

Càlcul/estimació:

Ktotal;

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

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

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

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

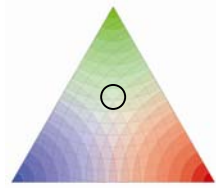
Exergia derivada de la combustió;  
Exfin=  $Em(1 - T_{ext}/T_{comb}) = 29847229$   
J/Kg $\cdot 10^5$  Kg=2,98 $\cdot 10^{12}$  J=  
2984 $\cdot 10^9$  J

**R: 11%**

Discussió: Aquest valor l'hem comparat amb altres de la bibliografia obtenint un resultat semblant.

Conclusions: Es perd molta energia destinada a escalfar els habitatges. Una part d'ella està, probablement, en l'origen de les illes de calor de les ciutats.

**G**



Descripció: Els càlculs de l'energia lumínica que es projecta fornir en relació a l'energia elèctrica subministrada per a obtenir-la. La representació gràfica pròpiament dita.

Dades: Es preveuen dos tipus de fluorescent per a tot l'edifici:

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

Amidaments:

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

Càlcul/estimació:

Una làmpada fluorescent converteix una energia origen elèctrica en una energia final radiant, amb un rendiment estàndard del 20%

**G:20%**

Discussió:

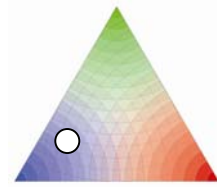
Aquest valor és molt discutible doncs nosaltres només veiem si estem que tingui contacte visual amb l'acció de la làmpada.

Conclusions:

Cal un treball molt important per a aclarir, des del punt de vista de l'exergia (és dir, en definitiva, de la utilitat) el paper de la il·luminació artificial tant pel que fa al consum d'electricitat que aquí és (pràcticament) obligat com al seu malbaratament (el que s'anomena contaminació lumínica).



**B**



Descripció: Els càlculs de l'energia per a produir el paper i una estimació sobre l'aigua a embrutar. Si hi ha reciclatge, una estimació de l'energia i l'aigua a embrutar. La representació gràfica pròpiament dita

Dades: Per a cada Tm

7500 kwh=7500 kwh·3,6·10<sup>6</sup> J/kwh= 27·10<sup>9</sup> J

(+40000 l. H<sub>2</sub>O)

En el nostre cas.-

-A Espanya 158 Kg paper/any i persona

-Segons CPI, les oficines tenen una ocupació d'una persona cada 10 m<sup>2</sup>, per tant, 7751,45m<sup>2</sup>·1persona/10 m<sup>2</sup>= 775 persones

Càlcul/estimació:

Cp=(158 Kg/any·persona)·775 persones =122450Kg/any=122,45 tm paper/any

Consum d'energia E=27·10<sup>9</sup> J/tm·122,45 tm/any=  $\frac{3306150 \cdot 10^6 \text{ J}}{}$

Consum d'energia amb reciclatge es redueix el 50 %=  $\frac{1653075 \cdot 10^6 \text{ J}}{}$

Amb una bona tecnologia disponible, es pot aconseguir un estalvi d'aigua del 47% (www.ideal.es/waste)

**B: 47%**

Discussió:

Els càlculs amb aigua no tenen una única definició. En efecte, pensem que l'aigua és un bé preuadíssim en certes situacions, per exemple aquest any de sequera o, pitjor, els milions de persones que no en tenen i super-abundant en altres llocs.

Conclusions:

Pensem que la valoració de la fórmula

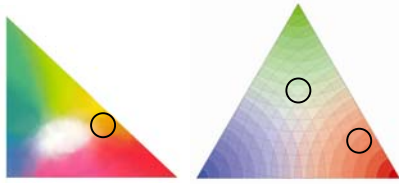
$$X_B = \sum_j \mu_j \cdot \Delta N_j$$

està establint un problema pels càlculs d'exergia.

La dificultat més gran apareix pel fet de disposar d'una manera àgil dels valors tabulats dels potencials químics  $\mu$  en diferents referències (les estàndard són degudes a Szargut).



**RG**



Descripció: Els càlculs de l'energia lumínica i calorífica que es projecta proporcionar en relació a l'energia elèctrica subministrada per a obtenir-la. La representació gràfica pròpiament dita

Dades: Al igual que al cas R, es preveuen dos tipus de fluorescent per a tot l'edifici:

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

Amidaments:

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

Càlcul/estimació:

Una làmpada fluorescent converteix una energia origen elèctrica en una destí radiant i una altra que desprèn calor. Tenen un rendiment estàndard del **20%**; el **80%** restant es pot suposar que es converteix en calor. Per a un cas d'hivern suposarem que no hi ha cap altra pèrdua.

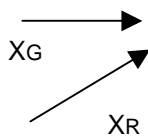
**G: 20% , R: 80%**

Discussió:

Hem comptat el que passaria amb una làmpada incandescent que emetés segons la llei de Planck. Hem separat, aleshores, els valors en el camp visual i fora d'ell.

Conclusions:

El  $X_G$  que ens preocupa, però, és el que mostrem en el dibuix adjunt. És a dir la impossibilitat, creiem, de considerar una suma directa entre la component de rendiment de treball (G) i la component de rendiment tèrmic (R). Pensem, per exemple, que en un cas d'hivern, la calor que subministren les bombetes (i és bastant!) va en el bon sentit. En un cas d'estiu, però, ha de classificar indubtablement com a negativa!!



**BR**



Descripció: Les necessitats d'aigua calenta i freda sanitària. Els càlculs de l'energia per a produir ACS i calefacció. Els acumuladors. La representació gràfica pròpiament dita

Dades: Elecció de la caldera segons les necessitats per ACS i calefacció per a un edifici col·lectiu de 24 habitatges de 80 m<sup>2</sup> (el costum es fer aquests càlculs en litres / hora que és una unitat molt més operativa que la unitat SI metres cúbics/ segon, com a conseqüència el resultat es presenta en kcal/h, 1 kcal/h = 1,16 watt)

1. Consum ACS horari punta;  
 $C_h=1837,44$  l/h a 45°C
  2. Potència:
  3.
    - per ACS  $P_{c1}= 64.310,4$  Kcal/h
    - per calefacció  $P_{c2}=116.697,6$  Kcal/h (estimació)
- TOTAL  
 $P_c= 181.008$  Kcal/h (2x100000 Kcal/h)
4. Consum diari acumulador  
 $C_a= 3674,88$  l (2x2000l)

Càlcul/estimació:

Tindrà dues parts:

- Per a l'apartat R podríem comptar un rendiment exergètic aproximat d'un **30%**
- Per a l'apartat B estem en el cas de que no podem atribuir al consum d'aigua "neta" un valor precís doncs l'aigua és molt valuosa en alguns llocs i molt poc en parts del Món on és molt abundant. Representarem un punt del **20%** doncs la major part l'escalfem i no la tornem a utilitzar.

**R:30%, B: 20%**

Discussió:

Com ja hem assenyalat a la fitxa B, els càlculs amb tema d'aigua són sempre de difícil definició. Ens agradaria insistir, però, en que és absolutament fonamental realitzar-los.

Conclusions:

Els càlculs d'exergia que combinen processos de despesa d'aigua amb processos energètics requeririen una recerca prioritària.

**GB**



Descripció: Els càlculs de l'energia elèctrica d'ús de l'ordinador i de les masses (qualificables energèticament) per a produir-lo. La representació gràfica pròpiament dita

Dades: Estimació d'ús i consum per 1 setmana. Dos casos: habitatge i oficines.

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

Energia consumida (1 setmana d'ús = 40 hores en oficina)

©

onsum real de l'ordinador: mesures realitzades amb Energy Monitor 3000

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

Càlcul/estimació:

Per a la part G, aprofitem  $4,58+2,23 = 6,81$  kWh dels 12 kWh nominals, és a dir una proporció del **57%**. Per a la part B, com hem discutit abans és difícil fer estimacions. A efectes de representació, anem a assignar un valor clarament desfavorable (un **10%**) per a resaltar el fet que la problemàtica relacionada amb l'eliminació de residus informàtics serà cada cop més important.

**G: 57%, B: 10%**

Discussió:

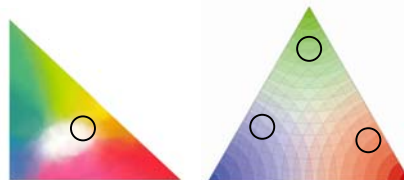
El càlcul de la part G es podria afinar aplicant, com es fa en els electrodomèstics, unes categories pel consum dels diferents ordinadors.

Per a la part B, hi ha encara una gran tasca de definició precisa dels càlculs a fer.

Conclusions:

Com ja hem assenyalat repetidament, la 'posta en comú' dels càlculs energètics amb els dels materials es revela com a clau.

**RGB**



Descripció: Els càlculs de la calor bona que s'afegiria a l'energia elèctrica d'ús de l'ordinador i de les masses (qualificables energèticament) per a produir-lo. La representació gràfica pròpiament dita

Dades: (les mateixes anteriors)

Dades extretes de <http://elmundo.es>

1 micro- processador	32 l H <sub>2</sub> O
	1,6 kg Petroli
	700g CO <sub>2</sub>
	72g Sust. Químiques nocives

Càlcul/estimació:

Per a la part G, aprofitem  $4,58+2,23 = 6,81$  kWh dels 12 kWh nominals, és a dir una proporció del **57%**. Per a la part R, podem assignar –en condicions d'hivern– un alt aprofitament doncs és una energia que ens apareix 'a més a més' (un **80%**, no més gran doncs el propi escalfament dels elements interns de l'ordinador és a la llarga negatiu). Per a la part B, mantindrem el **10%** anterior.

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

Discussió:

És important valorar que, en condicions d'estiu NO existeix aquesta part R positiva.

Conclusions:

Tots els fenòmens són en realitat RGB. De fet, els estudis parcials els fem sempre intentant comprendre'ls millor!!



## Conclusions

L'opinió de les persones que vegin la nostra representació gràfica és la que, en definitiva, decidirà si el nostre treball ha tingut l'impacte que preteníem. Nosaltres creiem haver demostrat la coherència dels nostres càlculs.

El procés de desenvolupament del projecte global d'avaluació i representació de l'exergía ens ha portat a plantejar possibles extensions al mateix:

- 1) Preparar en un suport tipus full de càlcul (MS-Excel, per exemple) algorismes 'robustos' per a calcular els tres tipus d'exergía en diferents situacions.
- 2) Preparar els algorismes de la part 1 per a introduir dades exteriors. Impulsar les mesures ràpides fetes pels propis usuaris.
- 3) Posar aquests algorismes en suport informàtic de manera que puguin ésser executats des d'ordinadors remots.

Esperem amb aquest treball incrementar la difusió dels bons càlculs tant a nivell de la nostra universitat com a nivell internacional.

<sup>1</sup>Escalas 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](http://www.ideasostenible.org)

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

<sup>3</sup>"Informe Final del grup Representació  
gràfica de l'Exergía pel Laboratori Real II"  
Jaume Roset Calzada. CITIES-UPC. Juliol  
2005 (institució que ha finançat el treball)

---

**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.