

*Idem*



# energía

**FACULTAD DE INGENIERIA**

Año 3 - Número 21

1979

**CENTRO DE ESTUDIOS  
DE ENERGIA**

## LOS PRINCIPIOS DEL ANALISIS DE LA ENERGIA NETA

HOWARD T. ODUM (\*)

### Introducción

La Fig. 1 ilustra un modelo de circulación energética en Estados Unidos que muestra la circulación de dinero en el PBI (producto bruto interno) como una contracorriente respecto del flujo energético. La energía ingresa del exterior, con alguna realimentación proveniente de la economía principal, que interviene para facilitar el flujo. La energía circula por la economía hasta que se dispersa en forma paulatina, como pérdida de calor. La realimentación se paga con dinero, pero no la energía del influjo del exterior. Advirtamos que el flujo monetario representado por la línea de rayas acompaña a las líneas del flujo energético únicamente dentro de los lazos cerrados: no sale para pagar los servicios gratuitos de la Naturaleza. Sólo se paga con dinero a las personas que procesan la energía, no a la Naturaleza que la proporciona. La energía del exterior se emplea gradualmente en todo el círculo económico que apoya el trabajo, de manera generalizada y difusa, no reconocida en el punto de su primera aplicación. El dinero sólo puede adquirir valores mientras se sostenga el influjo de energía proveniente del exterior.

Una diferencia fundamental entre los análisis económicos y energéticos es la evaluación de los influjos externos que, en última instancia, determinan la productividad. En los últimos tiempos, a esto se lo denomina "análisis de la energía neta".

### Energía neta de fuentes externas: coeficiente de rendimiento

La Fig. 2 muestra un influjo externo, con su realimentación desde la economía principal, y su contracorriente del dinero que paga el servicio. Este es uno de los sectores del influjo energético

(\*) Howard T. Odum, profesor de Investigación para postgraduados, Departamento de Ciencias de Ingeniería Ambiental, Universidad de Florida, Gainesville, E. U. A. Extracto, autorizado por el autor, del informe expuesto ante el Subcomité de Energía de la Cámara de Representantes de los E. U. A., el 25 y 26 de marzo de 1976.

externo de la Fig. 1. Para evaluar la fuente del influjo podemos calcular la energía neta, definida como la diferencia entre la energía entregada  $Y$ , y la realimentación  $F$  (para que sea útil como fuente primaria, tiene que haber energía neta). Para que utilicemos una fuente no es bastante que tenga potencial de alguna energía neta: también debe ser competitiva, y justificar la realimentación de trabajo valioso desde la economía principal. Para que una fuente de energía sea competitiva el cociente de rendimiento sobre realimentación debe ser alto con respecto a las fuentes alternativas.

#### La calidad energética: la capacidad de producir trabajo

Pese a que las ideas de energía neta y energía entregada son cualitativamente simples, resultan cuantitativamente complicadas porque las calorías de diferente tipo tienen distinta capacidad para generar trabajo, o para intervenir como amplificadores de generar trabajo. A veces se recurre a la definición académica de "energía", que dice que es la capacidad de realizar un trabajo, pero esto sólo se refiere a las comparaciones de flujos de energía del mismo tipo. El calor que se dispersa y se pierde no puede realizar ningún trabajo macroscópico, en tanto que las energías muy diluidas —como la luz del sol— para generar trabajo deben ser concentradas con gran costo de energía; otras formas, como las reservas de combustibles fósiles, ya están concentradas.

No falta quien postule que existe un mínimo termodinámico propio de energía requerido como insumo, para que un tipo de energía pueda transformarse en otro tipo de energía, con la pérdida inevitable de calor por energía usada. Si, como también algunos sostienen, los sistemas que subsisten en el mundo real funcionaran con el coeficiente óptimo para obtener el máximo de potencia útil, habría un coeficiente de transformación y un mínimo de pérdida de calor que se pondría en evidencia bajo condiciones de elección y competencia.

Si medimos los sistemas que funcionan bien y que compiten en el mundo real podremos obtener estimaciones de la pérdida de calor necesaria para transformar un tipo de energía en otro (con carga para potencia máxima). El análisis energético de los sistemas reales para transformar carbón en electricidad, caída de agua en electricidad, sol en alimentos, viento en bombeo de agua, etc. nos permite elaborar una tabla de requisitos de dispersión de energía por transformación. Véase la Tabla 1.

La Fig. 3 define los términos empleados en la Tabla 1. El factor de calidad de la energía es el cociente de dividir el insumo de energía, por la energía obtenida, de calidad superior. Puesto que

siemp  
habrá  
(input  
coefic  
es un  
L  
propo  
y tam  
neta.  
E  
costo  
mos  
sión  
sólo  
ficad  
energ  
gía.  
ción  
petiti

TRA  
DE

siempre hay realimentación de energía de calidad superior, también habrá que evaluar esto y expresarlo en las unidades del insumo (input) o del producto (output), e incluirlo en el cálculo del coeficiente, como lo ilustra la Fig. 3b, y también la 3c. La Fig. 4 es un ejemplo de planta de energía eléctrica alimentada con carbón.

Los análisis energéticos de los procesos representativos nos proporcionan los factores de calidad de la energía, de la Tabla 1, y también son útiles para estimar las contribuciones de energía neta. Las Figs. 4 a 6 ilustran estos análisis energéticos.

El desecho de energía potencial (disipada como calor) es el costo, en términos energéticos, de la ganancia en calidad. Sostenemos que en los sistemas competitivos que sobreviven bajo una presión que les impone desarrollar máxima potencia útil, la energía sólo tiende a ganar en calidad cuando se la realimenta como amplificador con un efecto de estímulo tan grande sobre la cadena energética de origen, cuanto es descarga la utilización de la energía. La razón que esgrimimos es que las cadenas sin realimentación secarían sus propias fuentes, las pondrían en desventaja competitiva y determinarían, por último, su reemplazo.

TABLA 1

EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA  
ESTIMACIONES DE LA ENERGIA NECESARIA PARA  
TRANSFORMAR ENERGIA DE DIFERENTE CALIDAD, EN LA  
DEL CARBON, BAJO CIRCUNSTANCIAS DE COMPETENCIA

Tipo de energía	Calorías equivalentes a 1 caloría de carbón
- Calor solar	11.000
- Energía solar en fotones	1.739
- Uranio <sup>235</sup> como es extraído de la mina	3.140
- Productos de fotosíntesis no cosechados	2.025
- Vapor geotérmico (de zona volcánica)	1.6
- Petróleo del Golfo de México	1.4
- Petróleo de Alaska	1.4
- Carbón de Occidente antes de la extracción	1.1
- Carbón después de extraído	1.0
- Energía de las mareas (de 20 pies: 6 metros)	0.6
- Gas de calefacción	0.55
- Caída de agua	0.32
- Electricidad	0.27

### Equivalentes de carbón (EC) para comprar la capacidad de trabajo

La conversión de todos los tipos de energía, en equivalentes de carbón, con los factores de calidad de la Tabla 1 facilita los cálculos de energía neta y otras comparaciones de flujos de energía, respecto de sus costos energéticos. Los equivalentes de carbón son convenientes, pues casi todo el mundo comprende y aprecia el trabajo que pueden realizar los combustibles para mover máquinas térmicas, en nuestra economía. Abreviamos (EC) los equivalentes del carbón.

Para convertir energías —como la solar, p.ej.— en equivalentes de energía fósil es conveniente reunir los factores de calidad en una cadena como la de la Fig. 5.

La energía de calidad superior —como la electricidad o las proteínas— es tenida por flexible, y se supone que los otros tipos son convertibles en ella. Si adoptamos como denominador común la conversión en electricidad podremos comparar tipos de energía que no son interconvertibles. Sostenemos que dos medios cualesquiera de convertir tipos de energía deben dar resultados similares, si ambos operan en el mundo real y bajo condiciones de elección de potencia máxima. Si los resultados no fueran iguales, uno sería más eficaz y desplazaría al otro; sería, por definición, el que usáramos.

### El empleo de datos económicos para estimar las realimentaciones difusas de calidad superior

En muchos análisis energéticos las realimentaciones de trabajo (F) desde la economía general (Fig. 2) son una mezcla de labor, mercancías y servicios expresada como flujo de dinero. Siempre que la podamos representar por un costo medio, en términos de energía, podremos estimar la cantidad de energía utilizada en toda la economía para generar la realimentación, mediante proporciones, donde ambos flujos de energía estén expresados en equivalencias de una misma calidad (p.ej. como equivalentes de carbón).

$$\frac{\text{Energía realimentada}}{\text{Energía total de la economía}} = \frac{\$ \text{ de flujo de realimentación}}{\$ \text{ de P. B. I.}}$$

El c  
dinero, e  
les libre  
combustibles  
la relació  
energía s  
a la de l  
cambia t

Algu  
energía  
estimar  
por dólar  
de intere  
deducir

### EVALUA

- Potenc
- Potenc
- Potenc
- Carbón
- Petról
- Petról
- Petról
- Petról
- Potenc
- Agricu
- Selvic
- Fisió
- Electr

(1) Coefic  
prima  
(2) No es

El cociente de la energía total respecto del flujo total de dinero, en nuestras determinaciones, incluye las energías naturales libres del sol, los vientos, las olas, etc. y también los combustibles fósiles comprados. La Fig. 6 ilustra cómo calculamos la relación entre el flujo de kilocalorías y el flujo de dinero. La energía solar está expresada en equivalente de carbón y sumada a la de los combustibles fósiles. Por la inflación, este coeficiente cambia todos los años.

Algunas discrepancias semánticas respecto del trabajo de la energía neta se refieren a una cuestión de contar dos veces. Al estimar la energía realimentada según un factor de kilocalorías por dólar, se incluye parte de la energía que retorna de la fuente de interés. Cuando es necesario para algunos fines, es posible deducir esto para determinar la energía independiente.

TABLA 2

EVALUACION DE LA ENERGIA NETA DE ALGUNAS FUENTES ENERGETICAS PRIMARIAS

TIPO	Coficiente de rendimiento (1)
- Potencia geotérmica (en zonas volcánicas)	57,4
- Potencia hidroeléctrica	19
- Potencia de las mareas (20 pies: 6 metros)	13,7
- Carbón occidental y transporte de 1.000 millas	10,6
- Petróleo de Alaska	6,3
- Petróleo del Golfo de México	6
- Petróleo del Cercano Oriente por intercambio	5,7
- Petróleo permutado por cereales	4,4
- Potencia de fisión nuclear	2,7
- Agricultura de poca energía	2,1
- Selvicultura de poca energía	1,5
- Fisión nuclear con un accidente	1,4 (2)
- Electricidad extraída del viento (de 16 Km./hora)	0,28

(1) Coeficiente de rendimiento mayor que 1; el viento no es una fuente primaria.

(2) No es neta.

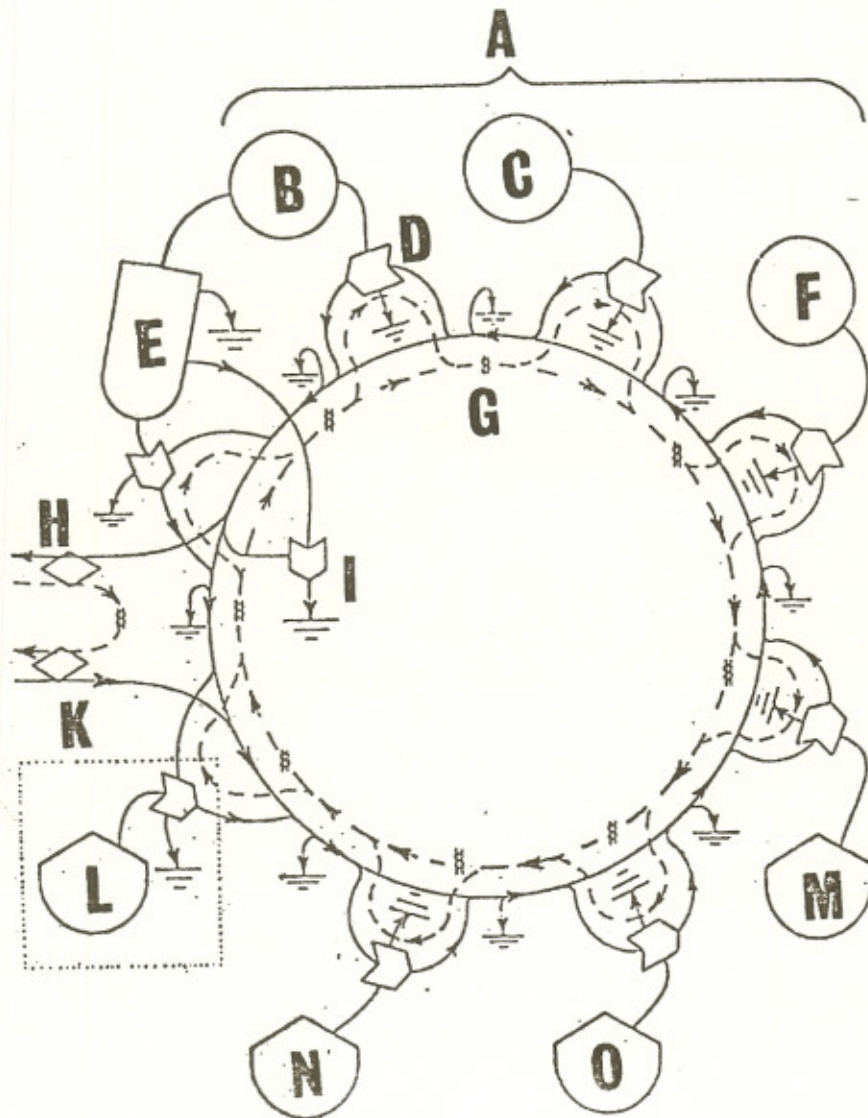


Figura 1

Modelo energético de Estados Unidos para examinar los sectores afectados por los influjos de energía externa. El dinero circula en el sentido de las agujas de reloj; la energía en sentido contrario.

A Fuentes Renovables, B Energía Solar, C Energía Hidroeléctrica, D Agricultura Forestal, E Sistema Ambiental, F Otras Fuentes, G Producto Bruto Interno, H Exportación, I Esfuerzo, K Importación, L Petróleo, M Energía Nuclear, N Gas, O Carbón.

La energía principal y alimentación por la economía

A Tratamiento

Coefficiente

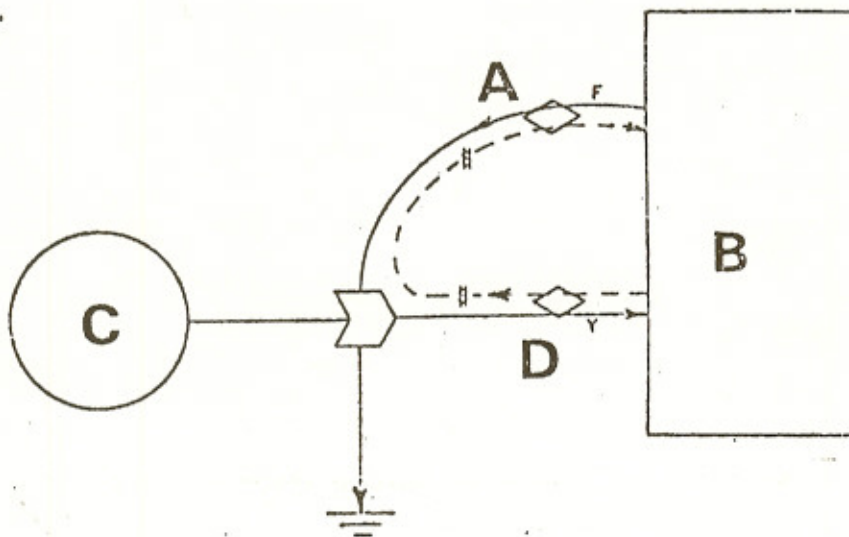


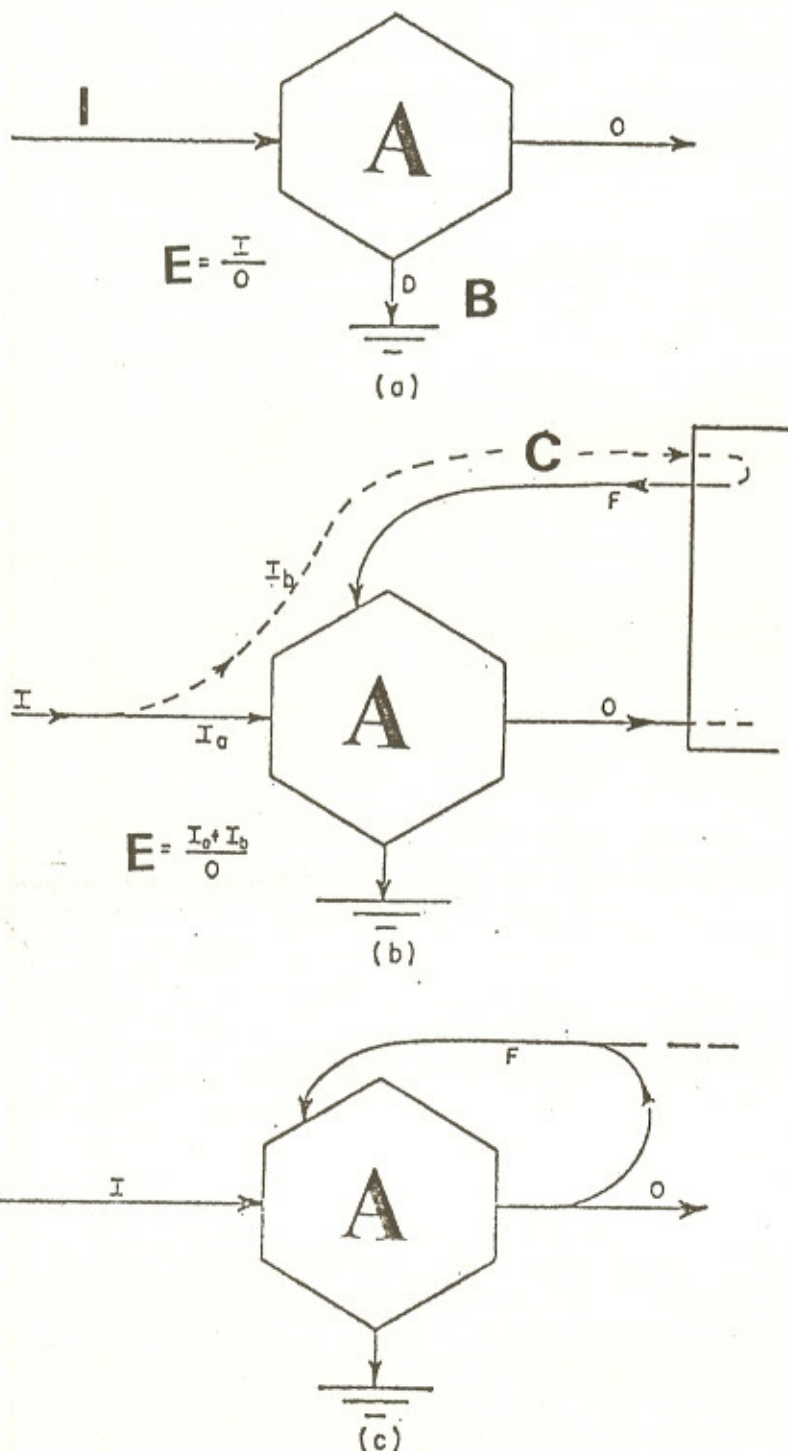
Figura 2

La energía fluye donde actúa una realimentación (F) desde la economía principal y facilita el influjo de energía desde una fuente externa. La realimentación (F) incluye alguna energía de (Y) que luego vuelve a circular por la economía. Buena fuente primaria es la que tiene un retorno relativamente pequeño en comparación con el rendimiento.

A Trabajo Realimentado, B Economía General, C Fuente Externa, D Rendimiento.

$$\begin{array}{l} \text{Energía Neta} = Y - F \\ \text{Coeficiente de Rendimiento} = Y/F \end{array} \left[ \begin{array}{l} \text{Unidades en equivalente} \\ \text{de combustible Fósil} \end{array} \right.$$





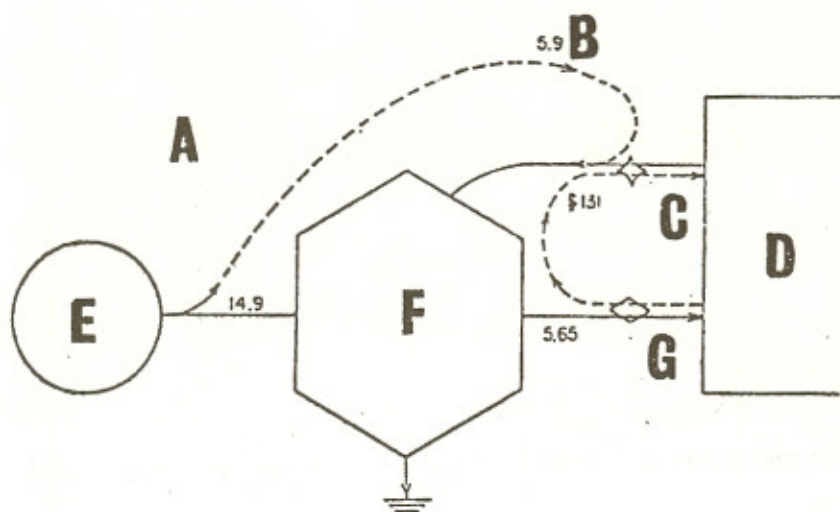
E

Ejemplo de circuito con carbón

A = 10<sup>12</sup> calor  
Economía princ

Figura 3

Definición de "Factor de Calidad de Energía". Por definición, el coeficiente solo se aplica a sistemas reales, positivamente competitivos, y supuestos en operación competitiva y máxima potencia. (a) Concepto muy simplificado, sin realimentación, (b) Los sistemas reales tienen realimentación (F) de calidad superior. El factor de calidad energética se obtiene al expresar (F) en unidades equivalentes de la energía del insumo (I<sub>b</sub>), (c) Otro modo de estimar el factor de calidad energética es expresar la energía de la realimentación en unidades equivalentes del producto, y restarla para obtener el resultado neto. A) Estructuras y procesos transformadores de energía, B) Degradado en pérdida de calor, C) Equivalente transformado, E) Factor de la calidad de la energía.



$$\frac{I}{O} = \frac{14.9 + 5.9}{5.65} = 3.7$$

Figura 4

Ejemplo de circulación de la calidad energética; generado de energía eléctrica con carbón. El factor de calidad es 3,7 calorías de carbón por caloría de electricidad.

A =  $10^{12}$  calorías/año, B Equivalentes de carbón, C = 131 millones, D Economía principal, E Carbón en la planta, F Generadores de energía con carbón, G Calorías de electricidad.

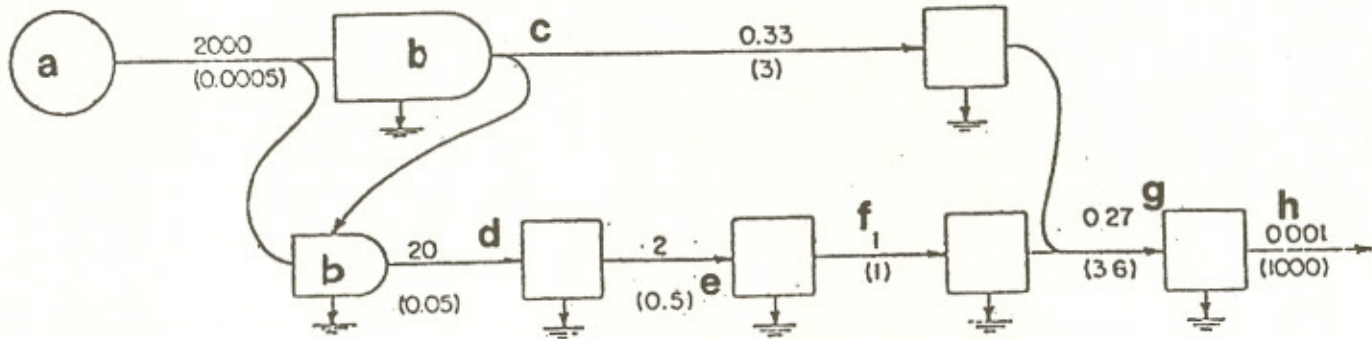


Figura 5

Factores de calidad de la energía, dispuestos en una cadena (ver Tabla 1). a) Sol, b) Circulación de la atmósfera y el océano, b') Plantas, c) Agua, d) Azúcar en las plantas, e) Madera, f) Carbón, g) Electricidad, h) Servicio Personal con Educación Superior, j) Dispersado, k) Aprovechado, l) Los números encima de las flechas son equivalencias de calorías en calor; los números entre paréntesis son equivalentes de calorías de combustibles fósiles.

C

A

Diagrama que muestra la energía de los renovables. 1 calorías de e para estima:

A = Luz de D = PBI u\$s bón = 7,5 x 1

Total de p

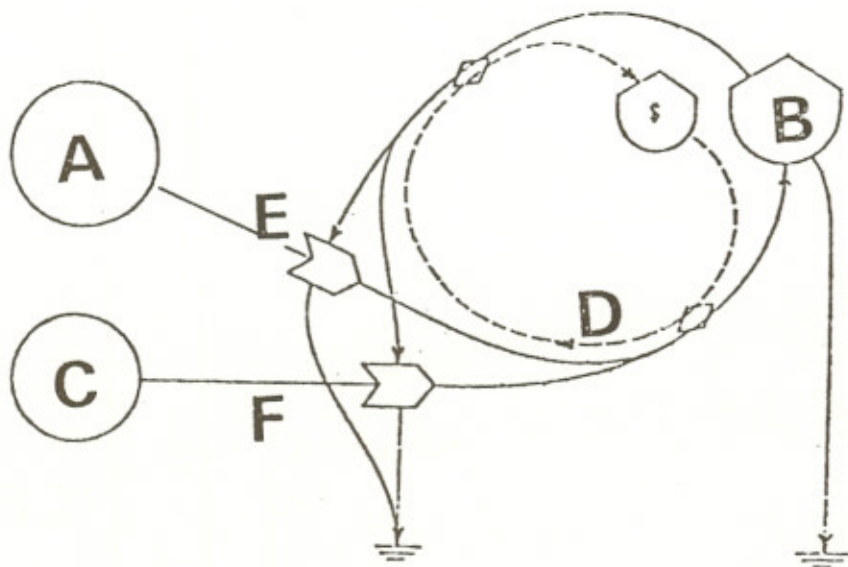


Figura 6

Diagrama que indica el flujo del Producto Bruto Interno, los flujos de energía de los combustibles fósiles y de las fuentes ambientales naturales renovables. Estos flujos se aplican para calcular el coeficiente de kilocalorías de equivalentes de carbón, respecto del dólar. El coeficiente sirve para estimar los flujos energéticos generadores de los flujos monetarios en la economía general.

A = Luz del Sol =  $14,3 \times 10^{18}$  kcal/año, B Activos de Estados Unidos, D = PBI u\$s  $1,4 \times 10^{12}$ /año, C = Combustibles fósiles, E = Equivalente carbón =  $7,5 \times 10^{15}$  kcal/año, F = Equivalente carbón =  $19,5 \times 10^{15}$  kcal/año.

$$\frac{\text{Total de la Energía}}{\text{PBI}} = \frac{26,7 \times 10^{15} \text{ kcal/año}}{1,4 \times 10^{12} \text{ u$s/año}} = \frac{19.000 \text{ kcal.}}{\text{equivalentes de carbón, por dólar}}$$