

## ¿UNA ÉTICA BIOFÍSICA CUANTITATIVA PARA ENFRENTAR EL DESAFÍO GLOBAL?

## ¿A QUANTITATIVE BIOPHYSICS ETHICS TO ADDRESS THE GLOBAL CHALLENGE?

*Enrique Ortega<sup>1</sup>*

### RESUMEN

Las discusiones filosóficas y políticas muchas veces se convierten en círculos sin salida, en los que apenas ocurren roces sin generar nuevas estructuras de pensamiento que permitan revelar la realidad y los caminos para la solución de los graves problemas que vivimos. Generalmente, cada una de las personas envueltas en la discusión, considera que tiene la razón en su argumentación y no hay un mediador que interactúe en el debate para ayudar a mudar los puntos de vista, ni un árbitro que pueda dar un veredicto. Y muchas veces la habilidad retórica y el peso de la tradición influyen en el resultado de los debates, para bien o para mal. ¿Será que es posible un debate filosófico y político basado en ciencias de carácter universal? En este caso, los argumentadores tendrían que presentar diagramas para explicar los sistemas que defienden, así como cuantificar los flujos de las energías involucradas, simular cuantitativamente las consecuencias de las alternativas y generar indicadores para evaluar las implicaciones de las propuestas. El progreso de la ciencia actual permite esa evolución. Ese nuevo tipo de discusión exige una capacitación en Economía Biofísica. Las ciencias necesarias serían: la Teoría General de Sistemas, la Ecología Sistémica, la Termodinámica de Sistemas Abiertos y la Psicología Holística. Estas ciencias permiten un abordaje sistémico de la realidad, explicitando su complejidad y dinámica. Podríamos tener un salto de calidad en el trabajo humano y en la interacción con la naturaleza si los jueces, los políticos y las personas comunes pudieran tomar decisiones con base en el abordaje sistémico. ¿Ya pensaron en una Ética Sistémica y sobre las implicaciones de ese abordaje para las religiones? ¿O para definir el precio de los recursos y de los productos? ¿O para definir el valor de una moneda? ¿O para medir la sostenibilidad de los modelos de producción? Por tanto, la educación sobre esas ciencias es una gran necesidad y esa capacitación tendría que ocurrir en paralelo con la educación formal y las actividades del día a día de las personas.

**Palabras clave:** economía biofísica, ética sistemática, recursos productivos, recursos renovables, sostenibilidad, emergía.

### ABSTRACT

---

<sup>1</sup> Laboratório de Engenharia Ecológica, FEA, Unicamp CP 6121 Campinas, SP, Brasil CEP 13083-862. E-mail: ortega@fea.unicamp.br

*Philosophical and political discussions often become ends in circles, in which barely scratches occur without creating new structures of thought that would reveal the reality and the ways to solve the serious problems we live. Generally, each person involved in the discussion, consider that it is right in his argument and no mediator to interact in the discussion to help move the points of view, nor an arbitrator may render a verdict. And often the rhetorical skill and the weight of tradition influence the outcome of the discussions, for better or for worse. Is it possible philosophical and political debate based on science universal? In this case, the arguments would have to present diagrams to explain the systems that defend and to quantify energy flows involved, quantitatively simulate the consequences of the alternatives and generate indicators to assess the implications of the proposals. The progress of modern science enables this evolution. This new type of discussion requires training in Biophysics Economics. The science involved would be: General Systems Theory, Systemic Ecology, Thermodynamics of Open Systems and Holistic Psychology. These sciences enable a systemic approach to reality, explaining the complexity and dynamics. We could have a qualitative leap in human work and interaction with nature, whether judges, politicians and ordinary people could make decisions based on the systemic approach. Have you thought of a Systemic Ethic and the implications of this approach to religion? Or to set the price of resources and products? Or to set the value of a coin? Or to measure the sustainability of the production models? Therefore, education on these sciences is a great need and that training should occur in parallel with formal education and everyday activities of people.*

**Key words:** *economics biophysics, systematic ethical, productive resources, renewable resources, sustainability, emerged.*

*Aceptado: abril 30 de 2009*

*Aprobado: mayo 26 de 2009*

## INTRODUCCIÓN

Las diferentes visiones del mundo (científica, tecnológica, artística, religiosa y política) deben actualizar su percepción de la realidad y actuar coherentemente. La crisis es grave, tiene varias dimensiones y está expuesta en los periódicos, los documentales, las conversaciones. Dos pensadores de la actualidad, Leonardo Boff (2006) y Washington Novaes (2006) reconocen la gravedad de la situación: “**¿Es necesario evitar la extinción de la especie!**”.

Urge una evolución de la conciencia para cambiar el modelo de gestión de los recursos de la biosfera: sustituir el capitalismo global basado en el crecimiento y la competencia excluyente, para otro sistema político-cultural que tenga como paradigma el ajuste a los límites planetarios, la colaboración entre todos y la inclusión social.

Delante de ese enorme desafío las preguntas esenciales son:

¿Cuáles son los problemas globales?

¿Cuáles son sus causas? ¿Cuáles son las soluciones?

¿Cuáles son las metas necesarias?

¿Cómo las personas deben participar?

¿Cuáles son las herramientas científicas que debemos usar?

### LOS PROBLEMAS GLOBALES Y SUS CAUSAS

Problema	Causa
Calentamiento global	Quema de combustibles fósiles y bosques
Disminución de los servicios ambientales	Expansión de la agricultura y de las ciudades
Previsión del déficit energético	Fin del petróleo
Previsión del déficit de alimentos y agua	Crecimiento poblacional
Polución del aire, de las aguas y del suelo	Patrón de producción industrial
Descomposición social en las ciudades	Éxodo rural
Falta de perspectivas para las sociedades	Agotamiento del modelo de desarrollo

Al analizar las causas, se descubre un helo: la capacidad humana de innovación para obtener el aprovechamiento de las reservas de energía fósil (carbón, petróleo, gas) que son recursos no renovables de gran poder de impacto. Al colocar esos recursos en circulación, los grupos retenedores de esa capacidad cambiaron la biosfera y crearon una situación de calamidad. En doscientos años fueron usadas las reservas de biomasa energética producidas durante centenas de millones de años. ¡Mitad del ahorro energético de la Tierra fue derrochado en dos siglos! ¡El restante tendría que ser usado sabiamente y no para continuar el proceso de autodestrucción!

La capacidad humana de modificar los ecosistemas, con la ayuda del petróleo, aumentó al máximo. El petróleo subsidia la extracción de minerales y de recursos naturales distantes y a toda la industria de transformación: petroquímica, farmacéutica, eléctrica, electrónica, comunicación y la agricultura química. Comemos, bebemos, oímos y respiramos petróleo. Los beneficios del uso de los energéticos fósiles fueron distribuidos de manera desigual; sin embargo, el superávit energético permite cuidar superficialmente de los problemas sociales. Ya en el caso de los problemas ambientales, ellos se acumularon e inquietan, pues aunque el mundo cambie, algunos problemas permanecerán: el calentamiento terrestre de un grado centígrado es ineludible y va a afectar principalmente a los más pobres; la recuperación de los ecosistemas lleva mucho tiempo y las pérdidas de especies son irreparables.

*Esta situación hace recordar la película de Walt Disney “Aprendiz de hechicero”. En ella, Mickey Mouse era un aprendiz de un brujo y tenía dos funciones penosas: limpiar los aposentos de la torre del castillo y traer baldes de agua del pozo distante. En cuanto el brujo hacia una siesta, Mickey leyó el libro de magia y aprovechó una receta para hacer que las escobas desarrollaran pies y brazos y las colocó para traer el agua del pozo, así él podría descansar tranquilamente. Descuidado, él no controló el curso de la magia y las escobas se multiplicaron exponencialmente e inundaron la torre. Al sentir el agua en los pies hizo despertar al brujo y paró con el loco hechizo. Aplicando esa lección a la realidad: ¡la sociedad tiene que despertar y cuidar de la Tierra!*

La identificación de los problemas socio-ambientales lleva a pensar en sus causas. Causas y efectos son interdependientes, pues la calidad de la causa establece su efecto. Entonces, la acción inversa a la causa de un problema muestra su solución. Todavía, en la práctica, la solución puede ser difícil, pues depende de las condiciones externas e internas del sistema, de la inercia y de la innovación. Está es la hora de invertir en las causas para hallar las soluciones y agruparlas dentro de metas.

### **Metas globales prioritarias**

#### *Primera meta: adquisición de conciencia*

Colocar en el día a día y en los medios de comunicación la situación real de la humanidad, buscar las causas de los problemas y mostrar sus drásticas consecuencias. Discutir públicamente el agotamiento del modelo de desarrollo global y los desdoblamientos de su falencia en el ámbito nacional, regional y local. Discutir el intercambio económico entre naciones, la inclusión de las “externalidades” negativas y de las pérdidas de servicios ambientales, el precio justo. Imaginar y proponer modelos renovables para la producción y el consumo. Debatir modelos culturales e ideologías. Descubrir las resistencias al cambio y a los factores que lo impulsan.

#### *Segunda meta: educación sistémica*

Uso intenso de la educación a distancia, usando varios recursos de comunicación, para que todos los grupos sociales puedan entender, de manera científica, cómo ocurrió en el pasado y cómo ocurre hoy la inserción de la sociedad humana en los ecosistemas.

#### *Tercera meta: ciencia, tecnología y cultura adecuadas*

Promover el uso de la economía biofísica y de la modelación y simulación de ecosistemas para interpretar correctamente el funcionamiento de los sistemas de producción y consumo. Generar alternativas tecnológicas y procedimientos de ajuste para conseguir un modelo de la producción y consumo ecológico. Promover un patrón de vida sustentable. Redistribuir la población de acuerdo con la capacidad de soporte renovable. Reducir al máximo los excesos.

#### *Cuarta meta: acciones justificadas*

Desarrollar sistemas que generen puestos de trabajo con alta renovabilidad y bajo costo. Reducir la quema de combustibles fósiles. Moratoria para la quema de los bosques. Recuperar la flora nativa. Ajustar, reestructurar e integrar la agricultura y las ciudades. Promover sistemas de producción sostenible de alimentos, energía de la biomasa, empleo de buena calidad y servicios ambientales. Moratoria para la deuda externa.

Puede observarse en la lista que los sistemas rurales (agricultura y ecosistemas remanecientes) tienen un papel vital en la solución de los problemas de la humanidad.

### Análisis sistémico de la relación campo-ciudad

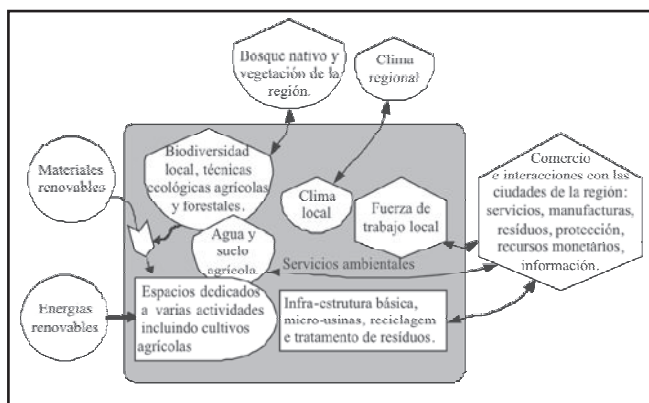


Figura 1. Muestra la agricultura ecológica

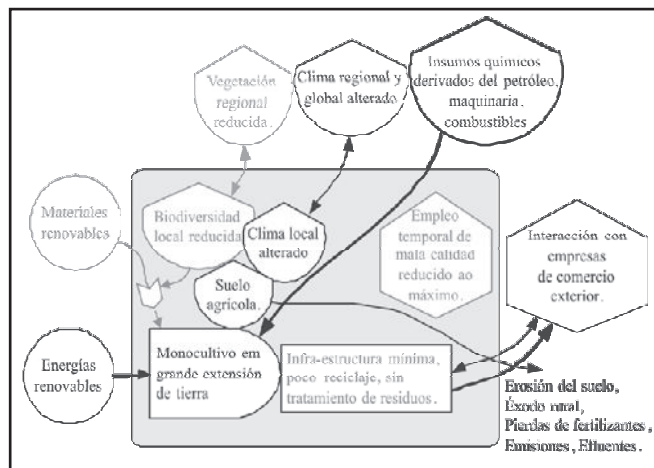


Figura 2. Muestra la agricultura química basada en los derivados del petróleo

**A partir de los diagramas de los modelos agrícolas podemos hacer un diagnóstico.**

**En los dos siglos anteriores la agricultura ecológica se tornó química y hubo:**

- Pérdida de la capacidad de incorporar materiales por la acción de la biodiversidad.
- Pérdida del capital natural (flora nativa).
- Destrucción de la biodiversidad.
- Pérdida del capital humano (éxodo rural y creación de desiertos verdes).

- Concentración de la tierra agrícola y de la riqueza en pocas manos.
- Aumento de productividad por el uso de insumos petroquímicos.
- Caída del precio de los productos rurales convertidos en “commodities”.
- Dependencia de los derivados del petróleo (insumos industriales).
- Acción de los lobbies de las industrias químicas para cambiar las leyes.
- Presión ideológica, política y militar por el pago de la “deuda externa”.
- Pérdida de la visión de la agricultura como un sistema orgánico.
- Emisión de gases de efecto estufa.

**Señalar los síntomas lleva a pensar en el fenómeno contrario como solución específica:**

- Recuperar la auto-suficiencia de materiales obtenidos por la biodiversidad.
- Recuperar el capital natural (flora nativa).
- Recuperar la biodiversidad.
- Recuperar el capital humano (invertir el éxodo rural y poli-cultivos).
- Reestructuración fundiaria y reforma agraria ecológica.
- Ajustar la productividad a los niveles proporcionados por los insumos ecológicos.
- Ajustar los precios de los productos usando la economía biofísica.
- Auto-suficiencia de materiales y energía.
- Reformular las leyes atendiendo los intereses mayores y la economía biofísica.
- Presión ideológica, política y militar por la “supervivencia de la especie”.
- Recuperación de la visión de la relación campo-ciudad como un sistema orgánico.
- Reducción de los gases con efecto estufa y establecimiento de la absorción ecológica.

**Una nueva herramienta: la economía biofísica**

La “economía biofísica” citada como parte de la solución global en los párrafos anteriores está surgiendo como resultado de una renovación crítica de la ciencia. La economía para tornarse biofísica tendría que adquirir la capacidad de hacer una contabilidad integral de los sistemas humanos considerando su inserción en el sistema de la biosfera. Los flujos de energía y materia de la biosfera proveen el potencial y también las limitaciones de desarrollo humano. Hasta ahora la solución impuesta por el capitalismo es “crecer” (sin analizar consecuencias). Se vende en los medios la idea de que los recursos que la Tierra ofrece son ilimitados y que la capacidad de absorber los impactos del crecimiento humano también es ilimitada. Se asume que la economía humana es “independiente de la economía de la biosfera”. ¡Nada más falso!

Un nuevo sistema político global debe tener como base la “economía biofísica” para saber cuáles son nuestros límites y cómo debemos producir y consumir. La formulación de la Economía Biofísica está en curso y exige la integración de conocimientos de muchas disciplinas: la Geología, la Geoquímica, la Físico-química, la Biología, la Ecología, la Historia, la Geografía, la Antropología, la Sociología, la Política, la Filosofía, la Ética y la Contabilidad sistémica. Existen varios grupos investigando el tema utilizando diversos abordajes: la huella ecológica, el análisis de energía incorporada, el análisis de “exergía” o potencial disponible y el análisis de “emergía”; esta última, es una forma de análisis más cuidadosa y rigurosa que tiene en

cuenta tanto la energía incorporada como la energía potencial.

### **El análisis “emergético” de sistemas**

Es una herramienta de contabilidad de la economía biofísica propuesta por Howard T. Odum [04, 08-19] que hoy es utilizada y perfeccionada por diversos científicos en todo el mundo. La metodología emergética logra medir el trabajo realizado por los ecosistemas a través de balances de energía de los procesos que generan los recursos de la biosfera; todavía ella logra expresar todos los recursos en la misma unidad (energía solar equivalente o “energía solar”). El análisis “emergético” surgió de la combinación de la Ecología de Sistemas y de la Termodinámica de los Sistemas Abiertos. Ella permite analizar sistemas complejos, tanto los naturales, como los dominados por el hombre. La “energía” se define como la energía utilizada, directa e indirectamente, para producir un recurso (que puede ser un bien o un servicio).

La clave del éxito en la aplicación de esta metodología está en la preparación de los diagramas de flujos de energía, materiales y servicios de los sistemas, los cuales deben identificar todas las fuerzas potenciales (inclusive las no actuantes), las interacciones y los productos (deseados o no). Después se procede a la obtención de los valores de los flujos de las entradas y de las reservas utilizadas. A continuación esos valores son convertidos en flujos de energía solar (mediante la multiplicación con factores de conversión de energía denominados “transformicidades”). Al tener todos los flujos expresados en la misma unidad surge la posibilidad de sumarlos de acuerdo con su procedencia y calcular algunos índices de valores agregados para obtener indicadores de desempeño. El análisis emergético logra así medir la sostenibilidad de un sistema, el saldo de energía líquida, la presión sobre el medio ambiente y la tasa de intercambio entre sistemas. Los índices emergéticos permiten evaluar las opciones que se ofrecen a las personas y a la sociedad.

### **La emergía como concepto de valor**

En la economía convencional, el precio de un producto corresponde a la sumatoria de los gastos realizados con insumos industriales y servicios, más el margen del lucro deseado. En cierta forma, el precio económico considera el trabajo humano agregado; sin embargo, no considera la contribución de la naturaleza en la formación de los recursos, ni en las pérdidas de servicios ambientales, ni en el costo de las externalidades negativas (que son pagadas por la población o los gobiernos locales).

La metodología emergética (Odum, 1996) mide todas las contribuciones (de la naturaleza y de la economía humana) en unidades de masa, energía, moneda, información y las coloca en términos equivalentes (energía solar). Para esto, se utilizan los nuevos principios del funcionamiento de los sistemas abiertos: auto-organización del sistema para maximizar el flujo de energía disponible (4ª Ley de la energía) y el establecimiento de una jerarquía para aprovechar la energía potencial disponible y maximizar la circulación de materiales (5ª Ley de la energía).

De acuerdo con Odum (2001b), si tomáramos en cuenta el principio de la jerarquía universal de energía, el trabajo puede ser comparado en una base común, expresando los productos y los servicios en unidades de emergía. De ese mismo trabajo extrajimos algunas definiciones:

- Emergía es la suma de energía disponible (exergía) de un mismo tipo, por ejemplo, energía solar utilizada de forma directa o indirecta, para producir cierto producto o servicio.
- La emergía mide la riqueza real.
- La calidad de alguna cosa es medida por su emergía por unidad de masa, energía, dinero, información, área, persona, región, país, biosfera.
- La emergía por persona mide el potencial de consumo.
- La emergía por unidad monetaria mide la capacidad de compra de riqueza real y es una tasa que se usa para convertir los flujos de emergía solar en flujos: en dólares, su valor económico equivalente. Los índices [emergía/dinero en circulación] varían mucho entre las naciones y ese hecho generalmente contribuye para la falta de equidad en el comercio internacional de recursos e inversiones.
- Es necesario conocer el origen de la emergía; ella necesita mostrar qué tan sustentable es. La metodología emergética permite calcular su porcentual de renovabilidad.

En relación con el trabajo de la naturaleza, se presentan dos casos extremos: el de la abundancia y el de la escasez. Cuando los recursos son abundantes ese trabajo se considera gratuito. En esa situación, ¡cuánto mayor es el trabajo de la naturaleza menor es el precio de los recursos! En ese caso, el valor de los recursos naturales es inversamente proporcional al precio. Vemos que el dinero pagado no representa el valor del trabajo incorporado. Por otro lado, cuando los recursos naturales se agotan (y la demanda se mantiene), el precio aumenta; ese hecho acelera la extracción de los recursos remanentes y coloca en riesgo su preservación y existencia. Los ejemplos son innumerables.

Las políticas públicas deben aprovechar los recursos energéticos disponibles y buscar una organización que permita el mayor flujo de emergía, considerando los ciclos naturales. La emergía proviene tanto de la naturaleza como de la economía humana. La tendencia de la economía humana es movilizar las reservas de alta calidad. Como la disponibilidad de los recursos varía con el tiempo, las políticas cambian a cada etapa de los ciclos de evolución de la vida. Para garantizar el aporte de recursos de la naturaleza se debe reconocer su trabajo e invertir para que ella pueda continuar ofreciendo los servicios ambientales: absorción de los residuos (sólidos, líquidos y gaseosos), producción de agua y materias primas, mantenimiento de la calidad del clima. El trabajo de la naturaleza debe ser entendido, reconocido y valorizado correctamente. El dinero obtenido por la contribución de la naturaleza debe ser empleado para reponer lo que fue extraído, mantener la fertilidad del ecosistema y generar controles para asegurar el suministro sostenible.

Para garantizar el correcto funcionamiento de los ecosistemas, todos los componentes



deben ser retribuidos correctamente, tanto la parte que sustenta la producción, como la que consume. Los valores expresados en emergía representan los verdaderos valores de los recursos naturales y antrópicos. Conviene discutir y divulgar esta idea para que las personas se acostumbren a utilizar los nuevos conceptos de contabilidad socio-ambiental.

### Antecedentes históricos

Los esfuerzos realizados en los dos siglos anteriores para usar la energía en la evaluación de proyectos (Martínez-Alier, 1987) fallaron porque consideraban que todos los tipos de energía eran equivalentes en su capacidad de realizar trabajo útil. En 1967, Odum comenzó a usar la expresión “energía incorporada” para denotar las calorías (o los Joules) de un tipo de energía necesario para producir otro tipo de energía; sin embargo, ese concepto era usado por otros investigadores con raciocinios y cálculos diferentes, lo que arrojaba resultados diferentes. Para diferenciar el método ecosistémico-energético, en 1983, Howard T. Odum y David Scienceman escogieron un nuevo nombre: emergía (escrito con “m”). Desde entonces, grupos científicos alrededor del mundo, en artículos y libros, pasaron a usar el término emergía con el significado de “memoria da energía de cierto tipo, usada para hacer otra”.

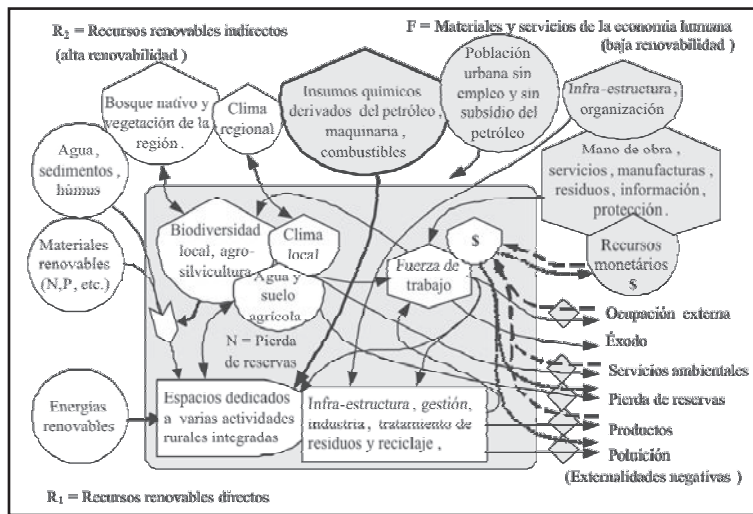


Figura 3. Sistema de flujos de energía, masa, dinero e información

### Conceptos básicos

Si consideramos que en todo hay energía disponible, la energía puede ser usada para evaluar la riqueza real en una base común. Como la emergía mide la jerarquía universal de energía, puede ser usada para agregar las calorías o Joules de diferentes tipos de energía. Las propiedades de un recurso dependen de la conversión de energía. La emergía corresponde a la cantidad de energía potencial utilizada. El factor de conversión se denomina “transformidad”. Por ejemplo: la transformidad de la lluvia es 1,53 x 108 joules de energía solar por kilogramo

de lluvia y la transformidad del petróleo crudo es 110000 joules de energía solar por joule de petróleo. De acuerdo con Odum (2001b), los sistemas de la naturaleza y la humanidad son partes de una jerarquía de energía universal y están inmersos en una red de transformación de energía que une los sistemas pequeños a los grandes y estos a sistemas mayores todavía. La transformidad mide la calidad de energía y su posición en la jerarquía de energía terrestre.

Los diagramas de flujo de energía muestran los elementos importantes para el funcionamiento del sistema: desde los flujos simples, a la izquierda, a los más complejos, a la derecha. La energía disponible es transformada en un proceso interactivo, en una energía de cantidad menor, sin embargo, de mayor calidad (con funciones o atributos diferentes), la cual será aprovechada en una próxima etapa de la cadena de transformación de energía potencial. La auto-organización del sistema, evidenciada por sus lazos de retro-alimentación, refuerza el funcionamiento de las estructuras primarias (a la izquierda) proveyendo energías de mayor calidad que vienen de la cima de la cadena trófica (a la derecha) buscando el aumento de la captación de energía del sistema (auto-catálisis).

Las calorías de energías diferentes no son equivalentes en su capacidad de trabajo útil. Por ejemplo, se necesitan 2000 calorías de luz solar para hacer 1 caloría de materia orgánica; 80000 calorías solares para 1 caloría de carbón; 300000 calorías solares para 1 caloría de electricidad y 10 millones de calorías solares para 1 caloría de trabajo humano.

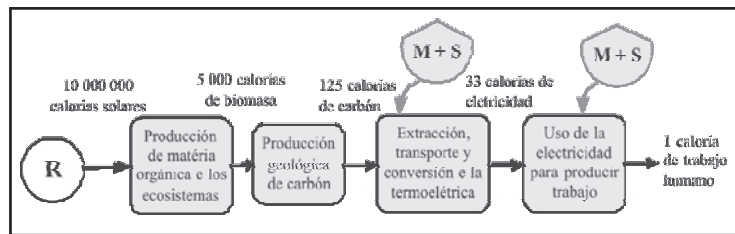


Figura 4. Valores de los flujos en la cadena energética de una termoeléctrica a carbón

Cuanto mayor es la posición del recurso en la cadena energética, mayor es la calidad de la energía; sin embargo, menor la cantidad. Hay menos energía, aunque más emergencia por unidad en las cosas valiosas. Los mayores valores de densidad emergética corresponden a la información genética. Como se comentó anteriormente, la emergencia de un recurso es la energía potencial de cierto tipo utilizada en su producción. En las décadas de los años 50 hasta los 70 se utilizaba como base la energía del carbón o la del petróleo. Hoy se usa la energía solar equivalente o “energía solar”. Para no confundir la energía que existe en un producto (Joules) con la que se usa para hacerlo (Joules de la energía solar equivalente consumida), las unidades de emergencia son denominadas emJoules solares (seJ) pues en la metodología emergética se usa la emergencia de aislamiento como la medida común. La transformicidad solar se define como emergencia solar/emergencia. Las unidades de la transformicidad solar son Joules de emergencia solar por Joule (seJ/J).

Odum (2001b) dice que es difícil pensar en términos de emergencia solar por tratarse de números

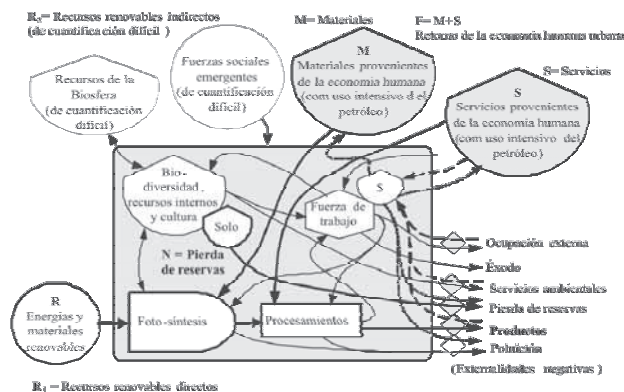
muy grandes y recomienda usar el equivalente económico denominado emDólar, el cual se obtiene dividiendo la emergencia solar entre el índice [emergía/dinero]. Los índices de emergencia/dinero (Em/\$) son obtenidos a través de la evaluación emergética de los países. Existe un libro que explica cómo hacer evaluaciones nacionales completas [10] y también hay tablas con valores de razón (emergía/dólar) de países [13, 14, 17]. El índice emergencia/dólar de la biosfera era  $1.1 \times 10^{12}$  sej /USD en 2000 (Odum, 2001b). De acuerdo con Brown y Ulgiati (1999) el 30% de la riqueza del mundo proviene de las energías renovables (sol, mares y calor de la tierra) y el 70% tiene como origen los recursos no renovables de la Tierra (petróleo, gas, carbón, minerales).

### Uso de la metodología emergética

Los sistemas que sobreviven en la naturaleza y en la economía son aquellos que se auto-organizan para usar adecuadamente los flujos de energía disponibles en cada una de las etapas de la evolución del sistema. Odum (2001b) postula el principio de la "Máxima emPotencia", que es una forma nueva del principio de la máxima potencia de Alfred Lotka, como la 4ª Ley de la Energía (Lotka, 1922 e 1925). Hoy, en época de abundancia, los seres humanos pueden darse el lujo de evaluar los productos y servicios con valores del mercado; sin embargo, en el futuro (en época de recursos menguantes y escasez), serán forzados a entender la lógica del funcionamiento de la biosfera y a organizar sus acciones para maximizar la potencia disponible remanente.

Para determinar si un recurso natural genera un saldo líquido debe realizarse una contabilidad emergética, colocando las contribuciones en unidades de emergencia solar. Solamente así, es posible comparar los flujos y obtener el rendimiento del sistema en relación con la inversión del sector económico. Las políticas públicas pueden promover el ajuste entre medio ambiente (producción, reservas finitas) y la economía (consumo) para escoger las opciones que aumenten la productividad (el uso de toda la emergencia) considerando la resiliencia del sistema (sabiendo que las energías no-renovables se agotan y las renovables exigen tiempo para recuperarse).

### Diagrama de emergencia



**Figura 5.** Diagrama sistémico de un sistema productivo

Es necesario colocar los límites del sistema e identificar todos los flujos importantes que cruzan las fronteras. Si hay algún recurso almacenado (reserva de energía) dentro de los límites del sistema que proporciona bienes o servicios útiles, debe ser visto como una fuente de energía. Si esa fuente es usada y repuesta en la misma tasa, no precisa ser considerada en el análisis, pues los flujos están en equilibrio (fuente renovable). Por otro lado, si ella es utilizada a una tasa mayor que la tasa de reposición, entonces estará actuando como una fuente no renovable. Cada uno de los flujos es mostrado como una línea curva que va desde la fuente de energía hasta el componente o los componentes que la utilizan. Cada flujo de entrada se convierte en una línea de cálculo en la tabla de evaluación de los flujos de energía.

### **Procedimiento de cálculo de los flujos de energía**

Para evaluar un sistema en estado estacionario (equilibrio dinámico), es necesario:

- Obtener valores anuales de las contribuciones de la naturaleza y de la economía humana. Esas entradas son colocadas en sus unidades usuales para materiales (kilogramos), para energía (Joules), para dinero (\$), etc.
- Incluir los flujos necesarios para establecer y mantener las estructuras y almacenamientos internos de recursos. Para calcular la depreciación de los bienes, los valores de las inversiones iniciales son divididos por su duración real estimada.
- Obtener de las tablas de trabajos previos el valor de la transformicidad o energía por unidad (kg, J, \$). La referencia debe constar en el memorial de cálculo.
- Calcular los flujos de energía como productos de la multiplicación de los flujos de entrada (en unidades/tiempo para una área de referencia) por los valores de energía/unidad. El valor obtenido corresponde al flujo de energía, que es expresada en emjoules solares por año. Flujo de energía solar de un conjunto de recursos:

$$J_k = \Sigma (Em_i)_k = \Sigma (Je_1 * Tr_1 + *Je_2 *Tr_2. . . + Tr_n*Je_n)_k \quad (1)$$

Donde: Tr = transformicidad solar y Je = flujo de energía potencial

- En el caso de los servicios, el procedimiento de cálculo es el siguiente: se colocan estas entradas en unidades de dinero/tiempo para un área de referencia. El dinero es convertido en dólares de acuerdo con la tasa de cambio del país para el año considerado; después, este valor se multiplica por el índice energía/dinero [sej/USD] de la economía del país para ese mismo año.  $Em_i = \$i * (Em/\$)$
- Finalmente todos los flujos de energía calculados son colocados en términos de emDólares anuales (Em\$/ano). El valor del flujo de energía se divide por el índice

energía/dinero de la economía del país.  $Em\$ = Em/(Em/\$)$

Tabla de cálculo de los flujos de energía de entradas y salidas de energía de un sistema

Recursos renovables de la naturaleza: $R = \sum (J_{e_i} * Tr_i)$ Recursos no renovables de la naturaleza: $N = \sum (J_{e_i} * Tr_i)$ Contribución total de la naturaleza: $I = R + N$
Materiales comprados $M = \sum (J_{e_i} * Tr_i)$ Servicios comprados $S = \sum (\$) * (Em/\$)$ Feedback de la economía $F = M + S$
Energía usada $Y = I + F$
Energía producida $E_p = \text{valor energético de los productos}$

### Diagrama de Flujos Agregados

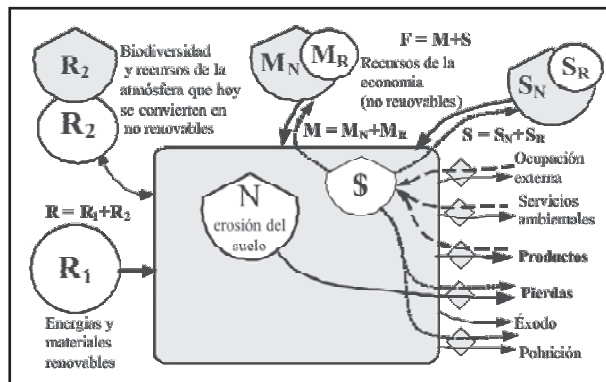


Figura 6. Diagrama simplificado de flujos agregados

### Índices de energía

Los índices emergéticos son calculados con los resultados de la tabla de evaluación de flujos de energía y son utilizados para hacer las inferencias del análisis emergético.

Transformidade: $Tr = Y/E$ Renovabilidade: $\%Ren = 100 (R/Y)$ Taxa de rendimento emergético: $EYR = Y/F$	Taxa de rendimento emergético: $EIR = F/I$ Taxa de carga ambiental: $ELR = (N+F)/R$ Índice de Sustentabilidade Emergético: $ESI = EYR/ELR$
Taxa de intercâmbio emergético: $EER = [Y] / \{(\text{produto}) * (\text{preço de venda}) * (\text{energia/USD})\}$	

**Figura 7.** Índices de energía de los sistemas de producción**Transformidad:**

El primer índice es la transformidad (“transformity”); este valor evalúa la calidad del flujo de energía. La transformidad solar del recurso producido por un sistema se obtiene dividiendo la energía total entre la energía o la masa del producto o por el volumen del servicio. Se puede comparar el valor obtenido con las transformidades de otros sistemas para descubrir cuál es menos eficiente, pues la transformidad es el valor inverso de la eficiencia ecosistémica.

$$Tr = Y/E_p \quad (2)$$

**Porcentaje de renovabilidad:**

Si fuera posible hacer un análisis completo de un sistema que produce un bien o un servicio se puede calcular su renovabilidad energética (sostenibilidad). Se calcula dividiendo la energía de los recursos renovables (R) entre la energía total usada en el sistema (Y).

$$\%R = (R / Y) * 100 \quad (3)$$

Las naciones desarrolladas poseen índices de renovabilidad bajos y los países llamados subdesarrollados, índices altos. Debido al intercambio desigual de energía ocurre una transferencia de la riqueza ambiental (subsidio de sostenibilidad real) de las naciones poco industrializadas a los países industrializados compradores de las materias primas. En el transcurso de un siglo, la renovabilidad del sistema terrestre cayó de 95% hasta 28%, de acuerdo con Brown (1998). En los sistemas industriales, la caída de la renovabilidad fue mayor: los países industrializados usan apenas 10% de recursos renovables. La Agenda 21 proponía cambiar el modelo global para recuperar la sostenibilidad; sin embargo, ella fue des-caracterizada por la acción de las empresas multinacionales y de los gobiernos más poderosos.

**Índice energético de rendimiento líquido:**

Para conocer el beneficio energético líquido, se calcula el índice de rendimiento energético (“energy yield ratio” o “net energy ratio”) el cual se obtiene dividiendo la energía total por la energía de las entradas que provienen de la economía (Y/F). Esta proporción indica si el proceso puede competir con otros en el suministro de energía primaria para la economía (conjunto de consumidores - transformadores humanos).

$$EYR = Y/F \quad (4)$$

Los combustibles fósiles, dependiendo de su concentración, precios y de la situación política internacional, proporcionan de 3 a 15 veces más energía que la energía de la economía invertida en su extracción y procesamiento. Sin embargo, la tendencia es la caída en el valor de EYR del petróleo. En el caso de los productos forestales se observa que rinde entre 2 y 10 veces la inversión hecha. Los productos agrícolas convencionales (agro-químicos) presentan valores pequeños: entre 1,1 y 2. Los sistemas agro-ecológicos presentan valores un poco

mayores. Para la producción convencional de caña de azúcar y etanol los valores son de 1,3 y 1,25. De estos números se pueden obtener algunas conclusiones interesantes.

Cuando el valor de EYR es próximo a la unidad, no hay emergía líquida, pues la captación de la energía de la naturaleza (I) es mínima:

$$EYR = Y/F \quad (5)$$

$$EYR = (R+N+F) / F = 1.0 + [(R+N) / F] = 1.0 + (I / F) \quad (6)$$

También puede utilizarse el porcentaje de emergía líquida:

$$\%EL = (EYR-1)100 \quad (7)$$

#### **Índice energético de inversión:**

Para prevenir si el uso de recursos de la economía (gastos invertidos) en un proyecto tendrá una buena contrapartida de recursos naturales (hasta hoy gratuitos), se calcula el índice de inversión de emergía (“energy investment ratio”). Este mide la proporción entre las entradas de la economía con el costo monetario (F) y la emergía de la naturaleza que es gratuita (I). Es una medida de la viabilidad económica en términos energéticos. Cuando la contribución de la fuente ambiental es alta, esta proporción es pequeña y los costos son bajos; índice que indica la habilidad del proceso estudiado al usar la contribución de la economía. Para ser competitivo, el proceso debe tener un valor de EIR similar al de otras actividades de la región. Si el proceso exige más de la economía que otras opciones, tendrá menos oportunidades de subsistir. Si demanda menos de la economía sus costos serán menores, lo que le dará condiciones de competir, prosperar en el mercado y aumentar la inversión.

$$EIR = F/I \quad (8)$$

#### **Índice de carga ambiental:**

El ELR (“energy loading ratio”) mide la proporción entre recursos no renovables y los renovables. Los procesos ecológicos presentan un valor bajo y los procesos que usan intensamente los recursos no renovables poseen valores altos.

$$ELR = (N+F)/R \quad (9)$$

#### **Índice de intercambio energético:**

El índice de intercambio de emergía (“energy exchange ratio”), la EER, es la proporción de emergía recibida con la emergía entregada en una transacción comercial. Las materias primas, tales como minerales y los productos rurales provenientes de la agricultura, pesca y silvicultura tienden a tener un valor alto de EER, cuando son comparados al precio del mercado. El dinero solamente paga los servicios humanos y no la extensión del trabajo realizado por la naturaleza, que contribuye en la obtención de estos productos.

$$EER = Y / \Sigma [(producción\ anual * precio) * (emergía/USD)] \quad (10)$$

Este indicador puede ser usado para evaluar los intercambios internacionales en una base de referencia común. Cabe decir que hay una gran falta de equidad en el intercambio de la



riqueza real en el comercio internacional. Las naciones desarrolladas al comprar materias primas de países menos desarrollados logran un saldo de emergía a su favor, pues la emergía de los dólares usados en el intercambio es mucho menor que la contenida en las materias primas adquiridas.

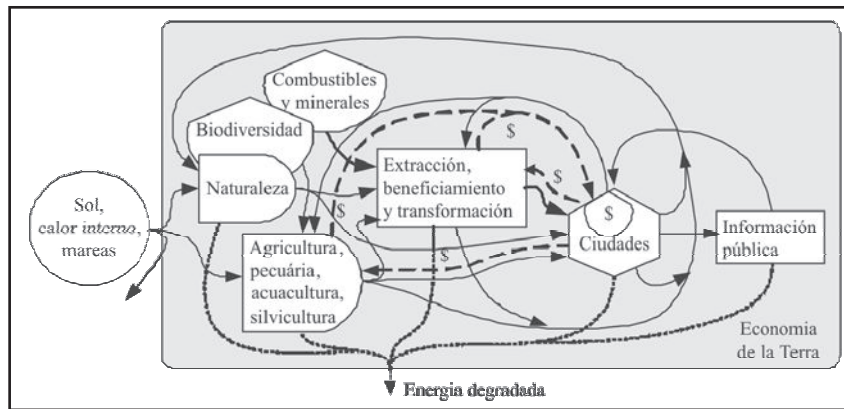
**Índice de sostenibilidad emergética:**

Este indicador (“emergy sustainability index”), el ESI, se obtiene por la división de dos índices emergéticos y se propone medir la relación beneficio/costo en términos emergéticos:

$$ESI = EYR / ELR \tag{11}$$

**CONSIDERACIONES FINALES**

**Certificación de sistemas productivos y la relación campo-ciudad:** La Figura 8 permite visualizar cómo la certificación emergética puede explicitar la calidad de la producción agrícola y su relación con las ciudades en el desarrollo sostenible (basado en recursos renovables). La evaluación de los flujos de cada subsistema permitirá hacer el acoplamiento entre producción, consumo y reciclaje. Los bancos y el gobierno consideraron la renovabilidad y el saldo de emergía, tan importantes como la rentabilidad.



**Figura 8.** Interacción completa entre campo y ciudad (adaptado de Odum, 2007)

Lo ideal sería aplicar la certificación emergética a todas las unidades de producción rural de las cuencas hidrográficas y con los resultados sugerir políticas públicas para el desarrollo sostenible. En este caso, las cuestiones éticas de la cuenca hidrográfica podrían ser abordadas en términos prácticos con valores numéricos:

- El costo real de cada producto, incluyendo la contribución de la naturaleza, los servicios ambientales, las pérdidas y las externalidades negativas.
- Las mejores alternativas de producción y consumo.



- El precio justo de los productos y servicios (“Fair Trade”).
- La relación entre biocapacidad y consumo humano (“Huella Ecológica”).
- La capacidad de soporte del sistema.
- El agotamiento del petróleo, los cambios climáticos y las presiones sociales.

### **Estado del arte de la metodología emergética**

Esta metodología todavía tiene preguntas por ser resueltas en la comunidad internacional de investigadores del análisis emergético, aunque ya permite el diagnóstico de sistemas y ofrece subsidios para políticas públicas y análisis de inversiones. Esta es útil para analizar el comercio entre el campo y la ciudad y entre naciones, pues revela el saldo emergético, generalmente oculto.

### **Análisis emergético “on-line” de sistemas**

El Laboratorio de Ingeniería Ecológica de Unicamp dio inicio desde 1994 a la construcción de una base de datos, métodos de cálculo y software para viabilizar la aplicación de la metodología emergética. Ya fueron colocadas en la red de Internet algunas planillas de cálculo de sistemas y está siendo ofrecida una planilla de uso general. Se trata de un sistema de cálculo “on-line” (Takahashi e Ortega, 2007). La dirección de ese nuevo recurso es: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/em-folios/software/>

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] BOFF, L. 2006. Consequências Filosóficas, Antropológicas e Teológicas frente à Iminência do Fim da Espécie. Vídeos da TV Câmara. Série "Reflexões Frente à Iminência do Fim da Espécie". Endereço na internet: <http://www.camara.gov.br/internet/tvcamara/default.asp?selecao=MAT&Materia=45238>.
- [2] BROWN, M. T., 1998. Environmental Accounting: Emergy Perspectives on Sustainability. Dialogo LI. Valoración económica en el uso de los recursos naturales y el medio ambiente. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico del Cono Sur (PROCISUR). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Montevideo, Uruguay, páginas 47-70.
- [3] BROWN, M.T. and S. Ulgiati. 1999. Emergy evaluation of the biosphere and natural capital. *AMBIO* 28(6): 468-493.
- [4] COLLINS, D. and H.T. Odum. 2001. Calculating transformities with an eigenvector method. pp. 265-279 in *Emergy Synthesis*, ed. by M.T. Brown, Center for Environmental Policy, Univ. of Florida, Gainesville, FL, EUA.
- [5a] LOTKA, A.J. 1922. A contribution to the energetics of evolution. *Proc. National Academy of Sciences, U.S.*, 8:147-155.

- [5b] LOTKA, A.J. 1925. Physical Biology. Williams and Wilkins, Baltimore, MD, EUA.
- [6] MARTÍNEZ-ALIER, J. 1987. Ecological Economics. Basil Blackwell, NY, 286 pp.
- [7] NOVAES, W. 2006. As Ameaças Que Pesam Sobre a Biosfera. Vídeos da TV Câmara. Série "Reflexões Frente à Iminência do Fim da Espécie". Endereço na internet: <http://www.camara.gov.br/internet/tvcamara/default.asp?selecao=MAT&velocidade=100k&Materia=44814>.
- [8] ODUM, H.T. Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology. Univ. Press of Colorado, Niwot, CO, 80544, EUA.
- [9] ODUM, H.T. 1988. Self organization, transformity, and information. Science 242:1132-1139.
- [10] ODUM, H.T. 1996. Environmental Accounting, Emergy and Decision Making. J. Wiley, NY, 370 pages. ISBN-471-11442-1.
- [11] ODUM, H.T. 2000a. Emergy evaluation of an OTEC electrical power system. Energy 25:3989-3993.
- [12] ODUM, H.T. and E.C. Odum. 2000b. Modeling for All Scales: An Introduction to Simulation. Academic Press, San Diego, CA, 458 pp. ISBN: 0125241704.
- [13] ODUM, H.T., M.T. Brown, and Sherry Brandt-Williams. 2000c. Introduction and Global Budget, Folio #1, Handbook of Emergy Evaluation. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida, Gainesville, 16 pp.
- [14] ODUM, H.T. 2000d. Emergy of Global Processes, Folio #2, Handbook of Emergy Evaluation, Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, 30 pp.
- [15] ODUM, H.T. 2001a. An Energy Hierarchy Law for Biogeochemical Cycles. pp. 235-247 in Emergy Synthesis, ed. by M.T. Brown, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- [16] ODUM, H.T., E. C. Odum, 2001b. Emergy Accounting. <http://dieoff.org/page232.pdf>
- [17] ODUM, H.T., E. C. Odum, 2001c. The Prosperous Way Down: Principles and Policies. University of Colorado Press, Boulder, CO, EUA. ISBN 0-87081610-1.
- [18] ODUM, H.T., Brown, M.T., 2007. Environment, Power and Society for the Twenty-First Century: The Hierarchy of Energy. Columbia University Press. EUA.

- [19] ODUM, HT. A complete list of publications at Emergy Systems Organization, 2007. <http://www.emergysystems.org>.
- [20] ORTEGA, E., 2008. Portal do Laboratório de Engenharia Ecológica da Unicamp: <http://www.unicamp.br/fea/ortega>.
- [21] TAKAHASHI, F., Ortega, E., 2007. Tabela de Emergia On-Line: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/em-folios/software>.

## GLOSARIO

**AUTO-ORGANIZACIÓN** – El proceso que los sistemas usan con el fin de desarrollar estructuras y organizaciones para usar la energía disponible.

**DIAGRAMAS DE SISTEMAS** - Esquemas gráficos que usan como símbolos dos circuitos de energía; su uso permite una visión general de un sistema mostrando sus partes y conexiones, los flujos y los almacenamientos de materiales, energía, información y dinero.

**ECOLOGÍA DE SISTEMAS**– El campo científico que resulta de la unión de la Teoría General de los Sistemas, la Ecología y la Termodinámica de los Sistemas Abiertos que proporciona una visión global para analizar los flujos de energía en los sistemas biológicos.

**EMERGIA** (escrita con "m") – Toda la energía disponible que es utilizada, directa o indirectamente, en la fabricación de un producto, expresada en unidades de un tipo de energía disponible, generalmente energía solar equivalente.

**EmJOULE** – La unidad de emergia; un Joule de energía disponible de un cierto tipo de energía previamente usada para producir un producto o un servicio.

**ENERGÍA** – Una propiedad de todos los sistemas, la cual en última instancia puede ser convertida en calor y medida en esas unidades (calorías, BTU, Joules).

**ENERGÍA DISPONIBLE**– Energía con potencial para realizar trabajo (exergia).

**EMERGIA LÍQUIDA(Net Emergy)** - El rendimiento en emergia de un recurso después de sustraer toda la emergia utilizada en el proceso de obtención del recurso.

**EMERGIA SOLAR**– La energía solar necesaria, directa e indirecta, para producir un recurso (producto o servicio). Las unidades son emJoules solares (abreviado seJ o semJ) o em-calorías solares (abreviado secal ou semcal).

**ESCALA INMEDIATA SUPERIOR**– Los espacios territoriales mayores ocupados por unidades con tiempo de sustitución mayor que deben ser considerados en la determinación de la conducta de un sistema debido a la supremacía que las unidades mayores ejercen sobre las unidades y los procesos de menor escala. (Vea jerarquía energética).

EXERGIA– Energía disponible que se usa en un proceso.

JERARQUÍA DE ENERGÍA– Convergencia de energía de muchas pequeñas unidades que contribuyen con cantidades menores de energía para un nivel superior con mayor capacidad de interacción y de control sobre las unidades menores.

ÍNDICE DE INTERCAMBIO DE EMERGIA– El cociente existente en el intercambio de bienes o comercio: [(energía recibida por el consumidor)/(energía pagada por el consumidor)].

ÍNDICE EMERGÉTICO DE INVERSIÓN(Energy Investment Ratio) – La proporción de energía de fuera (F) atraída a un área, debido al uso económico de la energía de los recursos ambientales locales generalmente gratuitos (I), en procesos de interacción de varios tipos de energía.

ÍNDICE DE EMERGIA LÍQUIDA(Energy Yield Ratio) – La proporción obtenida al dividir la energía incorporada no producto (Y) por la energía requerida para procesarlo (F).

MAXIMIZACIÓN DE EMERGIA– El proceso por medio del cual opera el principio de la máxima potencia dentro de un sistema para seleccionar, entre los componentes e interacciones disponibles, la combinación que resulta en la mayor circulación de energía en el sistema.

PRINCIPIO DE POTENCIA EMERGÉTICA MÁXIMA– La auto-organización elige el modelo de red con retro-alimentación que consigue maximizar la em-Potencia. Se trata de una reformulación del principio de la máxima potencia para reconocer que cada nivel, en la jerarquía natural de energía, se auto-organiza con el mismo principio, al mismo tiempo.

PRINCIPIO DE LA POTENCIA MÁXIMA– Una explicación de Alfred Lotka y otros investigadores para el fenómeno de la auto-organización observado en los sistemas (transformaciones de energía, padrones jerárquicos, lazos de control por retro-alimentación, acciones de amplificación, etc.). Lotka observó que prevalecen los sistemas cuya estructura y organización permiten aprovechar más energía disponible y usarla de forma más eficiente que las demás alternativas.

PRODUCTO ECONÓMICO BRUTO– O valor de mercado de todos los bienes y servicios producidos en una economía en un año (PNB).

REFUERZO - La acción de una unidad o de un proceso de reforzar la producción y la sobrevivencia de otra unidad o proceso, contribuyendo en su desempeño y bienestar; puede haber lazos de interacción de refuerzo mutuo entre sistemas diferentes. También puede ocurrir el fenómeno opuesto (refuerzo negativo): lazos de desgaste, que visan destruir otro sistema.

RIQUEZA – Término ambiguo que necesita un adjetivo para distinguir entre riqueza monetaria (estar rico con dinero) y riqueza real (ser rico en energía).

**RIQUEZA REAL**– Las entidades y flujos que contienen energía disponible (exergia) capaz de depreciarse (perder valor de acuerdo con la Segunda Ley de la Termodinámica); productos y servicios utilizables. Ejemplos: comida, combustibles, concentraciones de materiales, casas, organismos, informaciones, tierra, trabajo humano y controles.

**SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA**– Principio que dice que las concentraciones de energía se dispersan espontáneamente y que, en todas las transformaciones de energía alguna parte de la energía disponible se dispersa durante el proceso.

**TIEMPO DE SUSTITUCIÓN** (o de renovación) – El tiempo necesario para que un flujo de cierta energía sustituya una cantidad guardada del mismo tipo de energía. Por ejemplo, un flujo de 10 litros de agua por día sustituirá el volumen de líquido presente en un tanque de 1000 litros de agua en 100 días.

**TRANSFORMIDAD** (Transformity) – La emergencia de un tipo de energía que es necesaria para producir una unidad de energía de otro tipo. Ejemplo: se requieren tres Joules de energía calórica de carbón y un Joule de servicios (correspondiente a su equivalente en energía de carbón) para generar un Joule de electricidad. La transformidad de electricidad obtenida en cuatro emJoules (de energía de carbón) por un Joule (de electricidad).

**TRANSFORMIDAD SOLAR** – La emergencia por unidad de energía, expresada en emJoules solares por Joule (sej/J).

**USO SUSTENTABLE**– El modo de usar los recursos que la sociedad puede utilizar para sobrevivir en el futuro distante, debido a que la intensidad del uso y el sistema de aprovechamiento permiten renovar los recursos en los procesos naturales o los procesos dominados por el hombre.

**VALOR DEL DONADOR**– El valor de un producto determinado por el proceso de producción y no por la disposición a pagar (ejemplo: la madera de ley exige mucho trabajo de la naturaleza y actualmente los compradores no están dispuestos a pagar el precio debido).

**VALOR EN EmDÓLARES** – Dólares del Producto Nacional Bruto (PNB) obtenidos dividiendo la emergencia de un producto por la relación de emergencia/dólar de un país en un cierto año. Los dólares del PNB equivalentes a la riqueza medida en unidades de emergencia. El emDólar indica el poder de compra del dinero circulante en cada país.