

EL COMPONENTE ENERGÉTICO EN LOS PROGRAMAS DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL

CARLOS ARTURO RAMÍREZ ESCOBAR*

Resumen

El componente energético de los programas de estudios de Ingeniería Ambiental es establecido con base en los métodos de determinación de los Índices de Calidad Ambiental (ICAs). Así, los métodos exérgico y emergético se centran en el estudio de las transformaciones energéticas. Además, las escuelas de aplicación denominadas “Economía Ecológica”, “Ecología Industrial” e “Ingeniería Ecológica”, están relacionadas con los programas de investigación en estos métodos. El protocolo de Kyoto define las cantidades de emisiones utilizando estos métodos. Sin embargo, en la vía del cumplimiento de este Protocolo en la Unión Europea, las valoraciones obtenidas por estos métodos son complementadas mediante la implementación de subastas electrónicas ambientales. Estas subastas se implementan como un mecanismo pragmático de asignación y valoración de derechos de emisión de CO₂ e internalización de los costos ambientales. En consecuencia, se concluye que los programas de estudios de ingeniería ambiental deben incluir el logro de las habilidades cognitivas en estos métodos y aspectos de la valoración de la calidad ambiental.

Palabras claves: educación ambiental, exergía, emergía, subastas ambientales

Abstract

The energy component of the Environmental Engineering studies programs is established based on the methods of determination of the Environmental Quality Indices (EQIs). Thus, the exergy and emergy methods are centered in the study of the energy transformations. In addition, the schools of application denominated “Ecological Economy”, “Industrial Ecology” and “Ecological Engineering” are related to the research programs of these methods. The Kyoto protocol defines the emissions quantities utilizing these methods. Nevertheless, in the way of the fulfillment of Kyoto Protocol in the European Union, the valuations obtained by these methods are complemented by means the implementation of environmental electronic auctions. These auctions are implemented like a pragmatic mechanism of allocation and valuation of CO₂ emission rights and internalization of the environmental costs. Consequently, it is concluded that the environmental engineering studies programs should include the achievement of the cognitive abilities in these methods and aspects of the appraisal of the environmental quality.

Key words: environmental education, exergy, emergy, environmental auctions

INTRODUCCIÓN

Los programas de estudio, concebidos como proyecto, tienen la particularidad de su dinamismo; pues, en las condiciones actuales de revolución científico-tecnológica, es alta la certeza sobre la ocurrencia de cambios vertiginosos en la producción y acomodación social de los conocimientos. Posiblemente esta afirmación sonaría a frase de cajón, si los programas de estudios en referencia, no fuesen, precisamente, los de Ingeniería Ambiental. Estos programas pretenden ser el receptáculo académico de la disciplina que versa sobre la aplicación de las ciencias ambientales al mundo de la práctica. Los conocimientos que estos programas han de acomodar son

conocimientos complejos, muchas veces de tipo holístico, y sobre todo en construcción y pleno proceso de desarrollo por parte de la comunidad científica internacional.

Conceptos energéticos, como el de la exergía (desarrollado a mediados del siglo pasado) ó como la emergía (de solo hace dos décadas), han trasegado un camino dentro de las ciencias ambientales, formando un cuerpo estatutario en ellas y generando sendos programas de investigación con

* Ingeniero Mecánico, MSc en Turbinas, MSc en Ingeniería Eléctrica, PhD en Ingeniería Industrial. caramesco@hotmail.com.

correspondientes escuelas de aplicación. Estas escuelas producen profusa documentación científica de sus avances y logros. Tal desarrollo es motivado por una valoración social cada vez más grande y de mayor arraigo por los temas ambientales, que impele muchas veces a la toma de decisiones de tipo pragmático y aparentemente ecléctico de los acercamientos medioambientales en disputa.

Este escrito solo pretende la divulgación, a modo de familiarización para una base de diálogo y puesta en común, de lo que podría considerarse como el contenido, no exhaustivo, del componente energético de los programas de Ingeniería Ambiental, necesario para desarrollar competencias de valoración ambiental a través de los Índices de Calidad Ambiental, de manera que se atisbe a vislumbrar la fuerza de aplicación práctica de dicho componente, a través de una reseña bibliográfica, de carácter más ejemplarizante que riguroso. Así mismo, mostrar que al momento de llevar a la práctica social estas valoraciones, pueden ser objeto de transformaciones de valoración individual, a través de las llamadas subastas ambientales, que no necesariamente desvirtúan el objetivo del diseño ecológico de las políticas de gestión ambiental.

LOS ÍNDICES DE CALIDAD AMBIENTAL

En los últimos 20 años, las discusiones sobre las implicaciones ambientales del consumo de energía y otros recursos naturales, han ido pasando de preceptos eminentemente teóricos a poseer connotaciones de tipo práctico, que afectan la vida cotidiana de individuos, pueblos y naciones enteras; hasta llegar a la configuración de acuerdos multinacionales y globales como los de Montreal en 1992 y Kyoto en 1998 (Naciones Unidas 1998). Las exigencias hacia las ciencias y tecnologías, ingenieriles y económicas, han ido creciendo, en términos de desarrollo de concepciones, diseños, técnicas y tecnologías, que conviertan al orden de lo práctico y aplicable la complejidad de las ciencias ambientales.

Este es el tipo de problemas que atiende a resolver cualquier programa de estudios de Ingeniería Ambiental; entendiendo el término Ingeniería como “la disciplina que trata con el arte o la ciencia de aplicar el conocimiento científico a los problemas prácticos” (Cognitive Science Laboratory 2006). Dentro del orbe de los conocimientos científicos y a la vez prácticos que son menester de la atención de los programas de Ingeniería ambiental se encuentran los de la ciencia económica entendida como: “La rama de las ciencias sociales que trata con la producción, distribución y consumo de bienes y servicios, y su gestión” (Cognitive Science Laboratory 2006). Esto debido a que es la acción antropogénica de desarrollo económico una de las principales fuentes de modificación, a escala global, del medio ambiente terrestre.

A diferencia de las disciplinas teóricas, las “disciplinas prácticas como la ingeniería y la economía no se basan en abstracciones cósmicas, ni reclaman como propias la atemporalidad de las teorías más puras; sin embargo, las generalizaciones empíricas empleadas,.... pertenecen.... al mundo de las ideas, como los hechos generales que guían a los ingenieros cuando se embarcan en las tareas que requieren los encargos concretos, que se les hacen en cada ocasión individual” (pp. 166 (Toulmin 2003)). Así, en la literatura especializada se reportan diferentes índices de calidad ambiental (ICAs), en dependencia del acercamiento metodológico que los ingenieros ó economistas ambientales escojan en cada caso particular. Los ICAs comúnmente utilizados no están organizados dentro de un único marco integral. En el artículo de (Pykh et al. 2000) se describen y comparan cuatro aproximaciones diferentes de desarrollo de los ICAs, a saber:

1. El Método de las funciones de respuesta: desarrolla Modelos de regresión no lineal que representan la respuesta de un ecosistema a diferentes impactos, bajo un marco de stress-respuesta, donde se utilizan herramientas estadísticas para análisis de información ambiental.
2. El Método Exérgico (Exergético): desarrolla modelos de desequilibrio termodinámico basados en el concepto de exergía, el cual representa la energía libre que posee un sistema en relación a su ambiente. Este método provee una base común para representar muchos aspectos del desarrollo de los ecosistemas y la respuesta a los impactos ambientales, con una base única de medida.
3. El Método Emergético: desarrolla modelos diagramáticos basados en el concepto de Emergía, el cual representa conjuntamente valoraciones ambientales y económicas con una base única de medida. Este método provee una base común para integrar el desarrollo económico y los valores de protección ambiental en un único indicador.
4. El Método de la Teoría General de Sistemas: basado en modelos de simulación de sistemas complejos, en los cuales se utilizan metodologías de análisis de sistemas y simulación para identificar, cuantificar e interrelacionar los ICAs bajo un contexto de sistemas dinámicos, el cual provee explícitos vínculos entre causas y efectos (integración vertical) e identifica vínculos transversales a través de diferentes temas ambientales (integración horizontal).

Para ninguna de estas cuatro aproximaciones resultan extrañas las variables energéticas, que relacionan en forma de indicadores los conceptos de trabajo o energía. Tal hecho, nos lleva a escudriñar, desde el objeto y método de estudio de la Energética, ¿cuál de estos métodos poseen una aproximación, donde halle preponderancia el tipo de acercamiento propiamente energético? Para ello partiremos de la definición

de Energética acuñada por (Alexandrovski et al. 1988): “La energética, en sentido amplio, estudia al conjunto de los sistemas naturales, artificiales y sociales, destinados a la obtención, transformación, distribución y utilización de los recursos energéticos. Los Recursos energéticos son todas las fuentes naturales de energía, las cuales pueden ser convertidas en energía útil de diferentes tipos”. El estudio de tipo energético es desarrollado mediante el escrutinio de todos los tipos de transformación de energía desde las fuentes de los recursos naturales energéticos hasta los usuarios de la energía. Tal acercamiento conlleva a la determinación de una cadena energética, desde las transformaciones de sus fuentes a las transformaciones ocurridas durante el uso energético, contando con los elementos de gestión y económicos de tales transformaciones.

Este tipo de procedimiento energético es explícito en los métodos Exérgico y Emergético de determinación de los ICAs; lo que no se constituye en óbice para que desde la aplicación de la teoría general de sistemas no pueda ser modelado y simulado un proceso energético para el mismo propósito. Por oposición, las indagaciones por transformaciones energéticas, no resultan ser siempre evidentes a partir del método de stress-respuesta, que se construya con ayuda de modelos de regresión, aunque ello no quiere decir que la respuesta al stress originado por una variable energética no pueda ser indagada.

En razón a que los conceptos de exergía y de energía son derivados del trabajo y la energía respectivamente, y son utilizados como medida única integral para establecer los ICAs; además, ellos son la base de los métodos que describen las transformaciones energéticas, que nos pueden conducir a dilucidar el componente energético de los programas de ingeniería Ambiental, los detallaremos con mayor amplitud a continuación.

EXERGIA

La exergía, término introducido por Rant en 1956, es la porción de energía que puede ser transformada en trabajo mecánico (la parte restante, sin utilidad práctica, recibe el nombre de anergia).

La Exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener del desequilibrio entre un sistema y su entorno. Si en el proceso de alcance del equilibrio se utiliza un dispositivo que funcione con fricción y disipación, entonces no se realiza en trabajo, toda la exergía disponible; sino, solamente una parte; el resto se desperdicia, y se consigna como desperdicio de recursos. Pero si los dispositivos operan sin fricción y sin disipación; es decir, reversiblemente, entonces, a partir del desequilibrio del sistema con el medio ambiente, se puede obtener el trabajo máximo o toda la exergía presente en el sistema y su entorno. Así entonces, la exergía está definida por una función de estado (aunque no es un parámetro de estado).

A partir de esta definición, la energía puede considerarse constituida por dos partes, una de ellas “útil”, llamada exergía, y otra “inútil” -o pérdida-, denominada anergia.

ENERGÍA = EXERGIA + ANERGIA

Para la Ingeniería ambiental este concepto cobra una enorme importancia, de un lado, porque la exergía, siendo la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente (o entorno) que lo rodea, determina cuantitativamente el valor termodinámico de cualquier recurso; y, por otro lado, la exergía permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de una sociedad, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente.

A diferencia de la energía, la exergía es susceptible de crearse y destruirse. La creación de exergía se realiza destruyendo la exergía existente en otras partes; por ejemplo, como cuando se lleva a efecto la elevación de agua (creación de exergía) mediante una bomba accionada por un motor eléctrico, que al mismo tiempo adquiere la energía eléctrica de la quema (destrucción) de la exergía química de los combustibles, en una termoeléctrica). Por lo tanto, de la forma mecánica o termodinámica que se realice la creación de exergía, dependerá un mayor o un menor gasto de exergía de la fuente.

Una manera de medir la utilización adecuada de los recursos exérgicos es mediante la eficiencia exérgica, que no es más que el cociente de la exergía mínima requerida y la exergía consumida en la tarea (su valor máximo es uno). Esta razón es cualitativamente distinta de la eficiencia energética tradicional, la cual es el cociente de la relación entre la energía de salida (útil) y la energía de entrada a un determinado dispositivo.

LA ECONOMÍA ECOLÓGICA Y LA ECOLOGÍA INDUSTRIAL

Aunque la exergía apareció como un concepto termodinámico, su aplicación conceptual ha trascendido a otras esferas ingenieriles y económicas de reciente aparición y de actual y profusa investigación y discusión, convirtiéndose en un método en sí mismo. Este método ha originado un programa de investigación autoreferente con diferentes énfasis y ramas. Así, en Europa los fundadores de la Economía Ecológica ya fallecidos, Kenneth Boulding, Nicholas Georgescu-Roegen, insistieron en que la economía debía verse como un sistema abierto a la entrada de materiales y energía y a la salida de residuos. También, en el INSEAD, cerca de París, ha trabajado desde hace años el fundador de la Ecología Industrial y pionero de la Economía Ecológica, Robert Ayres, quien en 1989 empezó a usar la expresión «metabolismo industrial» y que en 1969 fué coautor de un famoso artículo sobre externalidades

(Ayres and Knesee 1969). Robert Ayres ha dirigido la redacción del Handbook of Industrial Ecology, publicado por la editorial Edward Elgar, la cual se constituye en la obra de referencia en este campo.

Los autores que escriben sobre el metabolismo industrial ven la economía en términos de flujos de energía y materiales. Junto con los economistas ecológicos, consideran a la economía un subsistema de un sistema físico mayor. Ellos adelantan una profusa discusión con los seguidores del paradigma económico neoclásico como es apreciable en los trabajos (Ayres and Warr 2003; Ayres 1998). Sin embargo, más allá de la controversia científico-económica el método exérgico goza de innegable aceptación práctica a la hora de consolidar un indicador de Calidad Ambiental en diferentes sectores industriales (Hotz et al. 2006; Ji and Chen 2006; Maruoka and Akiyama 2006; Mountouris et al. 2006; Sala et al. 2006; Seager and Theis 2004; Wang et al. 2005). El método exérgico también tiene presencia en trabajos investigativos de sectores completos o de la economía en su conjunto como los reportados en (Castillo and Mora 2000; Chen and Chen; Dewulf and Van Langenhove 2005; Dincer 2002; Ji and Chen 2006; Utlu et al. 2006; Utlu and Hepbasli 2006).

EMERGÍA

La emergía puede ser definida como “la energía disponible, de una cierta forma, que fue usada, tanto directa como, indirectamente en el proceso de elaboración de un producto o servicio” (Odum 1996). La exergía y la emergía tienen una relación; que ha motivado el que algunos autores llamen a la emergía como la “exergía incorporada”. Para comprender la emergía definiremos a la potencia exérgica como la tasa de cambio de Exergía en el tiempo, así:

$$P_x = \frac{dE_x}{dt}$$

Este es un equivalente del concepto físico de potencia para la Exergía. La Emergía se define entonces como la integral de la potencia exérgica en el tiempo, de la siguiente manera:

$$E_m = \int_{t=-\infty}^{t_0} P_x dt$$

En virtud, a que la emergía es una función dinámica (que depende del tiempo), le es asignado el papel de “memoria energética”, y se afirma que el análisis emergético provee una “huella ecológica”, la cual implica que las propiedades de los materiales físico-biológico-químicos pueden ser incluidas en el dominio del esquema de la emergía (Para un ejemplo de aplicación del concepto de la “huella ecológica” a la sociedad

china ver (Chen and Chen)). Uno de los coautores del concepto de emergía se refiere a esta propiedad de la siguiente manera: “Ahora describo ‘emergía’ como significando ‘memoria energética’, es decir, una medida de la cantidad de una forma de energía original [f] que ha sido totalmente usada o transformada en una nueva forma de energía. La forma original ha desaparecido, y se ha convertido sólo en una memoria, una memoria almacenada en las propiedades emergentes y la transformidad.” (Scienceman 1997), p. 210).

Aquí aparece un nuevo concepto, acuñado en 1987, el cual intenta cuantificar la calidad, al que han denominado “transformidad”, el cual representa a la emergía de un tipo requerida para producir una unidad de energía de otro tipo. La transformidad es utilizada para cuantificar la “posición jerárquica” de los recursos energéticos. Los diferentes tipos de energía que existen en la Tierra están jerárquicamente organizados a partir de la cantidad en julios de energía de un tipo que se requieren para generar energía de otro tipo². Para evaluar todos los flujos y almacenamientos sobre una referencia común, se usa a la emergía solar, que se define de la siguiente forma:

La emergía solar es la energía solar consumida, directa o indirectamente, para hacer un producto o realizar un servicio. Su unidad es el emjulio solar. (“solar emjoule” o sej, en inglés). Por ejemplo, hacen falta 3 emjulios (sej) de carbón y 1 sej de servicios (trabajo, por ejemplo) para producir 1 J de electricidad, la transformidad de la electricidad será 4 sej/J

Para comprender el impacto de estos planteamientos conceptuales escrutemos su aplicación en el cálculo de emergía de algunos almacenamientos globales, publicados en (Jansson et al. 1994), cuyo valor macroeconómico puede ser cuantificado por el método emergético. Las consideraciones para dicho cálculo son las siguientes:

- Para construir y mantener almacenados los recursos disponibles, es necesario realizar un trabajo que requiere energía y exige una transformación. El trabajo se mide por la energía que se debe consumir en él, pero la energía de un tipo no puede considerarse equivalente a la energía de otro tipo. Por ejemplo, un julio de energía solar tiene menor capacidad de realizar un trabajo que un julio de energía contenida en el carbón, puesto que la energía del carbón se encuentra más concentrada que la energía solar. La relación

² La jerarquización de los tipos de energía no se circunscribe solamente a la tierra, (Brown et al. 2004) propone extenderla a todo el Universo.

entre la energía solar y la energía del carbón se puede calcular determinando el número de julios de energía solar que se requieren para producir un julio de energía de carbón.

- Aunque la energía se conserva según la primera ley de la termodinámica; según la segunda ley, la capacidad de la energía para realizar un trabajo se agota y no puede ser reutilizada. Por definición, la emergencia solar solo se conserva
- La transformidad solar se define de la siguiente manera: “La transformidad solar es la emergencia solar que se requiere para realizar un julio de un producto o un servicio. Su unidad es el emjullo solar por julio”

EMERGÍA DE ALGUNOS ALMACENAMIENTOS GLOBALES (CAPITAL NATURAL)* POSIBLES ÓRDENES DE MAGNITUD

ELEMENTOS	TIEMPO DE REPOSICIÓN EN AÑOS	EMERGÍA ALMACENADA EN SEJ	VALOR MACROECONÓMICO (En Em\$ de 1992)
Infraestructura mundial**	100	9,44*1026	6,3*1014
Aguas dulces	200	1,89*1027	1,26*1015
Ecosistemas terrestres	500	4,7*1027	3,1*1015
Información cultural y tecnológica	104	9,44*1028	6,3*1016
Atmósfera	106	9,44*1030	6,3*1018
Océanos	2*107	1,89*1032	1,25*1020
Continentes	109	9,44*1033	6,3*1021
Información genética de las especies	3*109	2,8*1034	1,86*1022

* Producto del flujo anual solar 9,44*1024 sej/año y el orden de magnitud de los tiempos de reposición en la columna 2.

**Autopistas, puentes, oleoductos, etc.

La información adaptable (por ejemplo, la información genética) representa existencias de alto orden biológico, dadas con cada degradación de la energía a lo largo de grandes períodos de tiempo. De hecho, en la teoría del valor de la emergencia de H.T. Odum, la información genética viene a ser, por mucho, la que posee mayor cantidad de emergencia, en órdenes de magnitud por encima de la infraestructura económica humana [La emergencia es la cantidad de energía de fotosíntesis que se dedica a producir una estructura cultural biológica].

El método emergético ha hallado gran aceptación para tratar los problemas ecológicos referidos a organismos biológicos y a la producción agrícola como se observa en (Chen et al. 2006; Cuadra and Rydberg 2006; Martin et al. 2006; Rydberg and Haden) y (Jorgensen et al. 2004; Jorgensen and Fath 2006; Jorgensen et al. 2000). En particular la producción de biocombustibles en (Bastianoni and Marchettini 1996; Ulgiati 2001) es evaluada a través del método emergético. La producción industrial también ha sido objeto del método emergético como se aprecia en (Bastianoni and Marchettini 2000; Brown and Ulgiati 2002; Ulgiati and Brown 2002; Wang

et al. 2006; Yang et al. 2003). Los ecosistemas urbanos son evaluados en (Huang 1998; Huang and Hsu 2003; Marchettini et al. ; Meillaud et al. 2005; Siracusa and La Rosa).

LA INGENIERÍA ECOLÓGICA

Los bioeconomistas entienden los procesos económicos desde el punto de vista de los principios de la termodinámica, e insisten en que estos principios son aplicables tanto a los sistemas naturales como a los sistemas adaptados o transformados por el hombre. La segunda ley de la termodinámica resalta un aspecto clave en todos los procesos productivos: la actividad económica, entendida para satisfacer las necesidades humanas, se mueve contra la tendencia general del universo de dirigirse a un estado de mayor desorden o de mayor entropía. El trabajo humano se mueve contra esta tendencia, al incrementar el desorden del mundo físico. Pone en marcha la energía que duerme en la Naturaleza, convierte la energía “salvaje” en energía útil, “domesticada”. Pero para hacer que esta energía esté disponible, debe gastar una cierta cantidad de energía humana, tanto en forma de energía almacenada en máquinas como en forma de esfuerzo humano.

Por definición, el incremento promedio de la entropía asociado a cualquier proceso de producción es siempre mayor que la disminución local de la entropía que corresponde a este proceso. La actividad económica, por tanto, no escapa a las leyes de la física: el estado de organización de la economía sólo se incrementa en tanto en cuanto, el estado del universo en su conjunto decrezca. Georgescu-Roegen observa que “con la perspectiva de la entropía, con cada acción de un ser humano u organismo, e incluso con cada proceso de la Naturaleza, solamente se puede conducir a un déficit del sistema en su conjunto.....la entropía del ambiente se incrementa, no solo, con cada litro de gasolina en el depósito de su coche, sino que una parte sustancial de la energía libre que contiene la gasolina, en vez de mover su coche, se reflejará en un mayor aumento de la entropía...Cuando producimos una lámina de cobre partiendo del mineral, reducimos la entropía del mineral, pero solo al precio de un mayor incremento de la entropía en el resto del universo”. Los seres vivos están también sujetos a esta ley. Cada organismo vivo, incluyendo los seres humanos, lucha por mantener su propia entropía a un nivel constante, a base de sacar energía de baja entropía de su ambiente, especialmente en forma de alimento. Según Georgescu-Roegen “en términos de entropía, el coste de cualquier empresa económica o biológica es siempre mayor que el producto que obtiene, de forma que las actividades necesarias para llevarla a cabo reflejan necesariamente este déficit termodinámico”.

Así pues, desde la economía ecológica, es muy difícil de entender los modelos de producción neoclásicos actuales en razón a que a) a menudo no incluyen en absoluto los recursos, representando la producción como una función exclusiva del trabajo y del capital; b) si incluyen los recursos, suponen que “el capital es un sustituto casi perfecto de la tierra y otros recursos naturales” y c) son incapaces de reconocer a algún aspecto físico que pueda limitar esto; es decir, no desechan casos en los que a partir de la producción se constituya una masa mayor que la suma de las masas de todos los insumos, lo que sería una violación de la primera ley de la termodinámica. Aunque en este aspecto ya se han hecho esfuerzos para limitar la sustitución mediante una restricción del equilibrio de la masa en las funciones productivas. Sin embargo, a las violaciones de la segunda ley de la termodinámica, aún no se le interponen correcciones.

Georgescu-Roegen argumenta que “todos los recursos, y por supuesto, todos los objetos de valor, se caracterizan por una baja entropía; pero no todos los objetos que poseen baja entropía tienen valor económico. El valor no se puede explicar sólo en términos físicos, pero tampoco se puede explicar sólo en términos físicos de utilidad sin referencia alguna a la entropía, como los economistas neoclásicos pretenden”.

A partir del método emergético se ha creado una escuela de aplicación llamada la Ingeniería Ecológica. En (Odum

and Odum 2003) se plantea que “la ingeniería ecológica fue definida como la práctica de ajustar la economía de la sociedad al ambiente, ensamblando simbióticamente el diseño tecnológico con el auto-diseño ecológico. El campo de los sistemas de la ingeniería ecológica incluye a los ecosistemas auto-organizados ensamblados con la tecnología, mientras que los diseños de la ingeniería ambiental se paran normalmente en el extremo del conducto..... El concepto de la jerarquía de la energía proporciona los principios para la organización espacial y temporal que pueden ser sostenidos por el planeamiento.” Este planteamiento integral de economía e ingeniería con fines ecológicos no siempre es aceptado, sobre todo cuando se concibe que en la asignación de valor existe cierto aspecto de conocimiento distribuido por parte de los individuos de una sociedad, que difiere de tasaciones determinadas centralizadamente, aunque ellas sean efectuadas con los más elegantes argumentos científicos.

LAS SUBASTAS AMBIENTALES

Los países que ratificaron el convenio de Kyoto aceptaron internalizar en sus economías las emisiones que producen el cambio climático. Este hecho lo cual se constituye, en si mismo, en un reconocimiento de los planteamientos de la economía ecológica; sin embargo, el mecanismo de asignación de los derechos de emisión fue organizado por medio de subastas. Estas subastas, para el caso del CO2 representan el 10% de los derechos de emisión hasta el 2007 dentro de la Unión Europea. Se espera que se desarrolle una base empírica y experimental para seguir profundizando su utilización. Esto quiere decir que el mecanismo para asignación de valor de los derechos de emisión es descentralizado; es decir, atiende a la tasación individual que hagan, de tales derechos, compradores y vendedores dentro de una subasta electrónica. La organización Internacional GREENPEACE en relación con el mecanismo de asignación y “Basándose en los argumentos derivados de la teoría económica y en evidencias empíricas,.. recomienda para el futuro diseño de los Planes Nacionales de Asignación bajo el Programa de Comercio de Emisiones de la Unión Europea”, lo siguiente:

- A largo plazo todos los derechos deben ser subastados.
- Para el periodo de comercio de 2008-2012 los Estados Miembros deben establecer la máxima cuota de asignaciones a subastar contemplada en la Directiva Europea de Comercio de Emisiones, es decir, al 10% de la cuota total.
- La subasta de las asignaciones reduciría los beneficios extraordinarios (windfall profits) y tendría los mismos efectos en los precios de producción que la asignación gratuita.” (Greenpeace 2006)

Este tipo de subasta electrónica es objeto de estudio de la economía experimental, la cual une la simulación de las

circunstancias tecnológicas y económicas en un ambiente de decisiones humanas objeto de experimentación. Así, en (Hizen and Saijo 2001) se desarrollan experimentos conducentes a desarrollar los mecanismos de transacción propios del protocolo de Kyoto. Ejemplos similares en otros ámbitos se encuentran en (Burtraw et al. 2002; Cason et al. 2003; Klaassen et al. 2005; Ledyard and Szakaly-Moore 1994; Svendsen and Christensen 1999).

En el caso de la Unión Europea se percibe un acercamiento pragmático con algún grado de eclecticismo al aceptar, simultáneamente, la internalización de los costos del cambio climático en su economía y a la vez disponer de mecanismos descentralizados para valorar los derechos de emisión a través de subastas electrónicas ambientales. Estas subastas pueden ser extendidas a todas las partes signatarias del protocolo de Kyoto. A la vez, esto representa una oportunidad importante para Colombia como potencia de recursos renovables de energía y país signatario de dicho protocolo.

CONCLUSIONES

- Los métodos exérgico y emergético poseen un acercamiento de tipo energético al desarrollar indicadores de Calidad ambiental a través del estudio de las transformaciones energéticas, sustentadas en las leyes de la termodinámica.
- El desarrollo y la aplicación de estos métodos han generado sendos programas de investigación a nivel internacional, los cuales proponen un marco de aplicación práctica en la resolución de problemas ambientales, desarrollando escuelas como son: la Ecología Industrial, la Ingeniería Ecológica y la Economía Ecológica.
- El desarrollo pragmático de las aplicaciones de las ciencias ambientales, requiere de una combinación un tanto ecléctica de las escuelas de aplicación, incluyendo a la economía neoclásica y a la teoría de subastas.
- Aunque, es claro que el componente energético de cualquier programa de estudios de Ingeniería Ambiental debe estar difundido a lo largo de todo el currículo, se puede afirmar que dentro de los estudios profesionales, de profundización y a nivel posgradual, no pueden faltar componentes microcurriculares que desarrollen las competencias particulares de las escuelas de la Ecología Industrial, de la Ingeniería Ecológica y de la Economía Ecológica, y complementadas con las Subastas Ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDROVSKI, A. Y., M. I. KNELLER, D. N. KOROBOVA, MALININ N.K., B. I. OBREZKOV, A. S. REZNIKOVSKI, AND B. I. SILIAEV 1988. Hidroenergética. Energoatomizdat, Moscú.
- AYRES, R. AND B. WARR. Two Paradigms of Production and Growth. 2003. International Energy Agency. Annual Meeting of the International Energy Workshop jointly organized by EMF/IEA/IIASA 24-26 June 2003 at the Conference Center. Laxenburg, AUSTRIA. 24-6-2003. Ref Type: Conference Proceeding
- AYRES, R. U. 1998. Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological Economics* 26: 189-209.
- AYRES, R. U. AND A. V. KNESEE. 1969. Production, Consumption and Externalities. *American Economic Review* 59: 282-297.
- BASTIANONI, S. AND N. MARCHETTINI. 1996. Ethanol production from biomass: Analysis of process efficiency and sustainability. *Biomass and Bioenergy* 11: 411-418.
- , 2000. The problem of co-production in environmental accounting by emergy analysis. *Ecological Modelling* 129: 187-193.
- BROWN, M. T. AND S. ULGIATI. 2002. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production* 10: 321-334.
- BROWN, M. T., H. T. ODUM, AND S. E. JORGENSEN. 2004. Energy hierarchy and transformity in the universe. *Ecological Modelling* 178: 17-28.
- BURTRAW, D., K. PALMER, R. BHARVIRKAR, AND A. PAUL. 2002. The Effect on Asset Values of the Allocation of Carbon Dioxide Emission Allowances. *The Electricity Journal* 15: 51-62.
- CASON, T. N., L. GANGADHARAN, AND C. DUKE. 2003. Market power in tradable emission markets: a laboratory testbed for emission trading in Port Phillip Bay, Victoria. *Ecological Economics* 46: 469-491.
- CASTILLO, E. F. AND M. MORA. 2000. Mathematical modelling as a tool for environmental evaluation of industrial sectors in Colombia. *Waste Management* 20: 617-623.
- CHEN, B. AND G. Q. CHEN. Ecological footprint accounting based on emergy--A case study of the Chinese society. *Ecological Modelling* In Press, Corrected Proof.

----- . Modified ecological footprint accounting and analysis based on embodied exergy--a case study of the Chinese society 1981-2001. *Ecological Economics* In Press, Corrected Proof.

CHEN, G. Q., M. M. JIANG, B. CHEN, Z. F. YANG, AND C. LIN. 2006. Energy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115: 161-173.

COGNITIVE SCIENCE LABORATORY. WordNet. <http://wordnet.princeton.edu/> . 2006. Princeton University .

Ref Type: Electronic Citation

CUADRA, M. AND T. RYDBERG. 2006. Energy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua. *Ecological Modelling* 196: 421-433.

DEWULF, J. AND H. VAN LANGENHOVE. 2005. Integrating industrial ecology principles into a set of environmental sustainability indicators for technology assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 43: 419-432.

DINCER, I. 2002. The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy* 30: 137-149.

GREENPEACE. Como conseguir unos objetivos más ambiciosos en el segundo Plan Nacional de Asignación de derechos de emisiones. 2006. www.greenpeace.es, Greenpeace España. Ref Type: Report

HIZEN, Y. AND T. SAIJO. 2001. Designing GHG emissions trading institutions in the Kyoto protocol: an experimental approach. *Environmental Modelling & Software* 16: 533-543.

HOTZ, N., M. T. LEE, C. P. GRIGOROPOULOS, S. M. SENN, AND D. POULIKAKOS. 2006. Exergetic analysis of fuel cell micropowerplants fed by methanol. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49: 2397-2411.

HUANG, S. L. 1998. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis. *Journal of Environmental Management* 52: 39-51.

HUANG, S. L. AND W. L. HSU. 2003. Materials flow analysis and energy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning* 63: 61-74.

JANSSON, A., M. HAMMER, F. CARL, AND C. ROBERT 1994. *Investing in Natural Capital* . Island Press.

JI, X. AND G. Q. CHEN. 2006. Exergy analysis of energy utilization in the transportation sector in China. *Energy Policy* 34: 1709-1719.

JORGENSEN, S. E. AND B. D. FATH. 2006. Examination of ecological networks. *Ecological Modelling* 196: 283-288.

JORGENSEN, S. E., H. T. ODUM, AND M. T. BROWN. 2004. Energy and exergy stored in genetic information. *Ecological Modelling* 178: 11-16.

JORGENSEN, S. E., B. C. PATTEN, AND M. STRASKRABA. 2000. Ecosystems emerging:: 4. growth. *Ecological Modelling* 126: 249-284.

KLAASSEN, G., A. NENTJES, AND M. SMITH. 2005. Testing the theory of emissions trading: Experimental evidence on alternative mechanisms for global carbon trading. *Ecological Economics* 53: 47-58.

LEDYARD, J. O. AND K. SZAKALY-MOORE. 1994. Designing organizations for trading pollution rights. *Journal of Economic Behavior & Organization* 25: 167-196.

MARCHETTINI, N., R. RIDOLFI, AND M. RUSTICI. An environmental analysis for comparing waste management options and strategies. *Waste Management* In Press, Corrected Proof.

MARTIN, J. F., S. A. W. DIEMONT, E. POWELL, M. STANTON, AND S. LEVY-TACHER. 2006. Energy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115: 128-140.

MARUOKA, N. AND T. AKIYAMA. 2006. Exergy recovery from steelmaking off-gas by latent heat storage for methanol production. *Energy* 31: 1632-1642.

MEILLAUD, F., J. B. GAY, AND M. T. BROWN. 2005. Evaluation of a building using the exergy method. *Solar Energy* 79: 204-212.

MOUNTOURIS, A., E. VOUTSAS, AND D. TASSIOS. 2006. Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis. *Energy Conversion and Management* 47: 1723-1737.

NACIONES-UNIDAS. PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. 1998.

Ref Type: Statute

ODUM, H. T. 1996. *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making*. Wiley.

ODUM, H. T. AND B. ODUM. 2003. Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering* 20: 339-361.

- PYKH, Y. A., E. T. KENNEDY, AND W. E. GRANT. 2000. An overview of systems analysis methods in delineating environmental quality indices. *Ecological Modelling* 130: 25-38.
- RIVERO, R., G. MONTERO, AND R. PULIDO. 1990. Terminología para la aplicación del método de Exergía. *Revista del IMIQ* 17: 7-11.
- RYDBERG, T. AND A. C. HADEN. Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society. *Agriculture, Ecosystems & Environment* In Press, Corrected Proof.
- SALA, J. M., L. M. LOPEZ-GONZALEZ, M. RUIZ DE ADANA, J. L. MIGUEZ, J. EGUÍA, AND I. FLORES. 2006. Exergetic analysis and thermoeconomic study for a container-housed engine. *Applied Thermal Engineering* 26: 1840-1850.
- SCIENCEMAN, D. M. 1997. Letters to the Editor: Emergy definition. *Ecological Engineering* 9: 209-212.
- SEAGER, T. P. AND T. L. THEIS. 2004. A taxonomy of metrics for testing the industrial ecology hypotheses and application to design of freezer insulation. *Journal of Cleaner Production* 12: 865-875.
- SIRACUSA, G. AND A. D. LA ROSA. Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the emergy analysis. *Ecological Modelling* In Press, Corrected Proof.
- SVENDSEN, G. T. AND J. L. CHRISTENSEN. 1999. The US SO₂ auction: analysis and generalization. *Energy Economics* 21: 403-416.
- TOULMIN, S. 2003. Regreso a la razón. El debate entre la racionalidad y la experiencia y la práctica personales en el mundo contemporáneo. (Return to Reason. 2001). Ediciones Peninsula, Barcelona.
- ULGIATI, S. 2001. A Comprehensive Energy and Economic Assessment of Biofuels: When "Green" Is Not Enough. *Critical Reviews in Plant Sciences* 20: 71-106.
- ULGIATI, S. AND M. T. BROWN. 2002. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: The case of electricity production. *Journal of Cleaner Production* 10: 335-348.
- UTLU, Z. AND A. HEPBASLI. 2006. Estimating the energy and exergy utilization efficiencies for the residential-commercial sector: an application. *Energy Policy* 34: 1097-1105.
- UTLU, Z., Z. SOGUT, A. HEPBASLI, AND Z. OKTAY. 2006. Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production. *Applied Thermal Engineering* 26: 2479-2489.
- WANG, L., W. NI, AND Z. LI. 2006. Emergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP plant EIP). *Resources, Conservation and Recycling* 48: 56-70.
- WANG, W., R. ZMEUREANU, AND H. RIVARD. 2005. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment* 40: 1512-1525.
- YANG, H., Y. LI, J. SHEN, AND S. HU. 2003. Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system: an application of the eEmergy approach. *Ecological Modelling* 160: 13-21.