



# XIV JORNADAS DE ECONOMÍA CRÍTICA

*Perspectivas económicas alternativas*

Valladolid, 4 y 5 de septiembre de 2014

## *Una propuesta de solución a la paradoja verde desde el punto de vista de la exergía*

Guillermo David Hincapié Vélez y  
Edison Alonso Hernández Gómez

Universidad Nacional de Colombia

# UNA PROPUESTA DE SOLUCIÓN A LA PARADOJA VERDE DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA EXERGÍA

Guillermo David Hincapié Vélez

Edison Alonso Hernández

## Resumen

El presente artículo pretende sentar las bases de una aproximación al problema planteado por la Paradoja Verde –en el trabajo de (Sinn, 2008) –a partir de la vinculación al análisis del concepto de Exergía. Utilizando un modelo dinámico de uso de energía con polución, se argumenta que la eficiencia en términos de exergía impone limitaciones y restricciones a la tasa de extracción de un combustible fósil de acuerdo a una necesaria reducción del año ambiental derivado; como consecuencia, las tasas óptimas de extracción deben recalcularse en razón de la exergía del proceso productivo. Se concluye que dicha eficiencia tiene incidencia sobre las posibles anticipaciones que hagan los productores de combustibles fósiles y, con ello, se generan otras condiciones para que tenga cumplimiento o no la Paradoja Verde, condiciones que no han sido por ahora contempladas en la literatura.

## 1. Introducción.

La creciente preocupación por los efectos negativos de las actividades productivas sobre el medio ambiente, ha estimulado el surgimiento de un cuerpo de teorías y prácticas empíricas en la ciencia económica, reunidas bajo el nombre de Economía Ambiental, que a la fecha presentan un grado significativo de desarrollo. Preciso resulta indicar que tales planteamientos encuentran su base en el modelo de Equilibrio General Competitivo y en las distintas líneas de investigación que se generan una vez se relajan algunos de sus supuestos, por ejemplo, el de fallas de mercado existentes en los bienes ambientales. Estas teorías predicen que instrumentos como los impuestos y los permisos negociables de emisión, entre otros, permiten generar condiciones para que la economía con estas fallas y externalidades negativas al medio ambiente se aproxime lo máximo posible a un marco de eficiencia económica.

Si bien la literatura al respecto es amplia, la Economía Ambiental no constituye el único enfoque bajo el cual se han tratado las problemáticas ambientales ocasionadas por la producción. De hecho, a partir de 1970 con los trabajos de Georgescu-Roegen (1975), ha tomado lugar en el escenario académico una nueva corriente en economía que, a diferencia de la Economía Ambiental que parte del enfoque neoclásico estándar, se propone definir una crítica sobre la forma misma en que los economistas proceden: la Economía Ecológica o Termo-Economía, y más concretamente, la Exergo-Economía. Esta corriente plantea, apoyada en las leyes de la termodinámica, que la economía generalmente ha asumido como cierto que la energía se conserva en el proceso productivo y que, por tanto, es una máquina de movimiento perpetuo sin limitaciones claras, cuando lo que ocurre es todo lo contrario, es decir, existe una parte de la energía que se destruye y su consumo por parte de la economía se encuentra en proporción directa con la entropía y sus consabidas connotaciones de daño medio ambiental, (Rosen, Dincer y Kanoglu, 2008). El término *Exergía* es acuñado entonces para referirse a la parte de la energía dedicada potencialmente a *trabajo útil*, la cual está en relación de equilibrio con el sistema natural. La Exergía implica, entonces, un tratamiento eficiente de la energía consumida por un sistema económico-Wal (1978) define la extensión del concepto para el caso de los sistemas sociales y económicos-.

La eficiencia económica es, por tanto, distinta a la eficiencia que se deriva de los planteamientos de la termo-economía, y en tal sentido pueden establecerse distancias entre estos campos aunque sean compartidas sus preocupaciones de fondo. Sin embargo, como expone Rosen (2008), estas distancias no son insalvables, pudiéndose retroalimentar ambos enfoques y enriquecer con ello el cuerpo teórico. Tal es uno de los propósitos del presente trabajo de tesis.

Existe un nuevo debate en Economía Ambiental donde la mencionada retroalimentación resulta especialmente fructífera: la llamada *Paradoja Verde*. Propuesta por Sinn (2008), plantea básicamente que la tendencia generalizada de

utilizar e inducir prácticas productivas de menores daños ambientales es anticipada por los productores de combustibles fósiles, aumentando sus procesos de extracción y con ello acelerando el calentamiento global; el carácter de paradoja viene entonces del hecho que incluso, el establecimiento de políticas ambientales termina generando un daño ambiental mayor por cuenta de esta anticipación que los economistas generalmente no consideran al centrarse más en un enfoque de demanda para basar sus análisis. La literatura ha mostrado la permanencia de esta paradoja en el contexto de impuestos a los productores de combustibles fósiles o, por otro lado, de subsidios a productores de recursos renovables y con efectos ambientales positivos, como los bio-combustibles. Así, ¿Cómo puede entonces un enfoque de exergía servir al análisis de un tema nuevo como dicha paradoja sugiere ser? Al considerar que la exergía constituye, como medida física, la puesta en marcha de un proceso productivo que hace un uso eficiente- medioambientalmente- de la energía utilizada, su consideración en el análisis económico de este caso podría, en el mejor de los eventos, llegar a replantear dicha paradoja o proponer otras condiciones para que esta se mantenga o no. Como se mostrará en la sección referente a la metodología, al considerar la exergía en un modelo sencillo de utilización de energía en un sistema económico, un nivel particular de esta puede conducir a una dinámica de extracción tal que no genere un agotamiento completo del combustible, dejando un remanente en la tierra; si esto ocurre, resulta posible que los productores de combustibles fósiles se muden a la producción de recursos renovables y de menor impacto ambiental, es decir, haciendo posible que el efecto ambiental global pueda ser menor. En suma, y haciendo énfasis en el hecho de que hasta ahora se está en un plano hipotético de la investigación, la paradoja verde podría llegar a no cumplirse. Tal es una de las conjeturas centrales del presente trabajo.

Por otro lado, el problema que plantea la Paradoja Verde resulta crucial para el análisis de la efectividad de medidas como el protocolo de Kyoto, e incluso de la efectividad de impuestos y subsidios. Precisamente, un número importante de investigadores en exergo-economía, han concluido que los impuestos basados en la pérdida de exergía resultan generando de una manera más directa procesos productivos más eficientes en el uso de energía, y con resultados mucho más significativos en relación con el daño ambiental que los impuestos convencionales (Santarelli 2004) y (Borchiellini et al 2000).

El presente artículo está organizado en 4 secciones incluyendo la introducción. En la segunda, se presenta una revisión del estado del arte tanto de la Paradoja Verde como de la Exergía y su consideración como elemento del análisis económico. En la tercera, se plantea al modelo dinámico de extracción de combustible con eficiencia exergetica, y las conclusiones fundamentales a las que conduce se hacen extensivas para replantear el problema bajo el que ha sido tratado la paradoja verde. En la cuarta, por su parte, se presentan las conclusiones y se hace referencia a nuevos campos de investigación derivados de los anteriores planteamientos.

## 2. Estado del Arte.

### *La Exergía en los Procesos Productivos y su Inclusión en la Economía*

A partir de las críticas de Georgescu-Roegen (1971) en las cuales empiezan a ser consideradas las leyes de la termodinámica como elementos de necesario estudio de los fenómenos económicos, inicia una corriente de pensamiento que postula a la energía como elemento central del funcionamiento de cualquier economía y punto de partida de cualquier análisis. Pero no solo la energía concentró el interés de estos investigadores, la segunda ley de la termodinámica condujo a estos a plantear el concepto de *Exergía* y su relación con la entropía y la entropía negativa. Wall (1986) establece que este interés investigativo es producto de la interacción entre la estadística mecánica y la teoría de la información en la física, en últimas, la teoría de sistemas físicos, por medio de los cuales empezó a verse la economía.

El sistema social puede considerarse un sistema físico en la medida en que en él tiene lugar una pretendida conversión de recursos para su definición como sistema, y su interacción con otros incluyendo el sistema natural en el cual está inmerso, (Wall 1986). De acuerdo a esta concepción y a un nivel de abstracción propio de la Física, si se considera un sistema que está en desequilibrio termodinámico, su tendencia natural al equilibrio puede ser aprovechada para extraer o generar trabajo. De esta manera, se da la ecuación de balance energético, ecuación (1), la cual indica que la salida de trabajo de un sistema ( $w$  negativo) depende de que la energía del estado final ( $E(S)$ ), sea cada vez menor que la del estado inicial  $E$ ; dado que  $\frac{dE}{dS} > 0$  siendo  $S$  la entropía generada, se colige que *...el trabajo máximo obtenible del sistema se logra mediante una evolución que no aumente la entropía del universo dado que debe cumplirse que  $dS \geq 0$ , (es decir, la entropía no puede reducirse).*<sup>1</sup>

$$w = E(S) - E_0 \quad [1]$$

Cuando se considera la inclusión de variables importantes en los procesos termodinámicos como la presión, la presencia de una atmosfera y composiciones químicas, la anterior definición de trabajo, ecuación (1) se amplía a la de *trabajo útil*. El trabajo útil de acuerdo Dincer (1997) , se puede distribuir en cuatro partes, a. Aumentar la energía termodinámica disponible del sistema y de la atmosfera, b. Aumentar la energía química disponible del sistema y la atmosfera, c. bombear calor desde la atmosfera al sistema a una temperatura dada y c. energía degradada que da lugar a una generación neta de entropía en el sistema. Esta energía degradada constituye la irreversibilidad propia del proceso ya que en la práctica se debe aportar más trabajo por cuenta de dicha irreversibilidad.

<sup>1</sup> De acuerdo a (citar), este problema es idéntico al de analizar el trabajo mínimo necesario para pasar de un estado inicial de equilibrio a un estado final de desequilibrio termodinámico.

En este orden de ideas, La Exergía se define como una medida física de la acción potencial de un sistema para llevar a cabo trabajo *útil*, es decir, es la parte de energía destinada a la generación de trabajo útil mínimo necesario para lograr un estado del sistema con respecto a un referente de equilibrio del sistema – que sería el de equilibrio termodinámico- (Rosen, Dincer y Kanoglu 2008)<sup>2</sup>. La termodinámica plantea, entonces, que dicha medida física representa una dimensión de calidad de la energía utilizada en un sistema y a diferencia de esta, que puede conservarse, la exergía se destruye en el proceso. Esta situación muestra una de las condiciones más importantes de este concepto, su consumo o destrucción, irreversibilidad del proceso, implica la generación de entropía y, por lo tanto, el uso de la energía teniendo como referente la exergía plantea un concepto de eficiencia que, distinto al económico, pone el equilibrio del sistema natural en el primero de los planos, (Santarelli 2004). A este respecto, Gaggioli y Wepfer (1980) exponen: *“In order to accomplish any process, exergy is supplied in one or more forms of “fuel”. Part of the supply is converted to other forms and delivered in desired products. A substantial portion, however, is consumed by the process in order to accomplish the conversion, and another generally smaller portion is lost in effluent wastes. The per cent efficiency of the process is the ratio of exergy in the products to that in the various supplies. The inevitable inefficiencies are the consumptions and losses.”*

A partir de estas consideraciones, surge la llamada termo-economía o exergo-economía en el caso de la exergía como campo particular de investigación, (Rosen 2008). Un importante número de investigadores en este campo-Rosen (2002) Rosen, et al (2008), Tyagui, et al (2005), Rosen y Dincer (2003), Massardo et al (2003), Byriant J (2007) Aires et al (2003) ,Zhang et al (1980), entre otros, muestran cómo al considerar la exergía en los procesos productivos, la eficiencia tecnológica así incentivada no solo promueve la sostenibilidad de los recursos o insumos naturales empleados, sino que ayuda a mitigar los efectos nocivos de estas actividades sobre el medio ambiente, es decir, plantea una sostenibilidad ambiental de dichos recursos.

### *La Exergía y el medio ambiente*

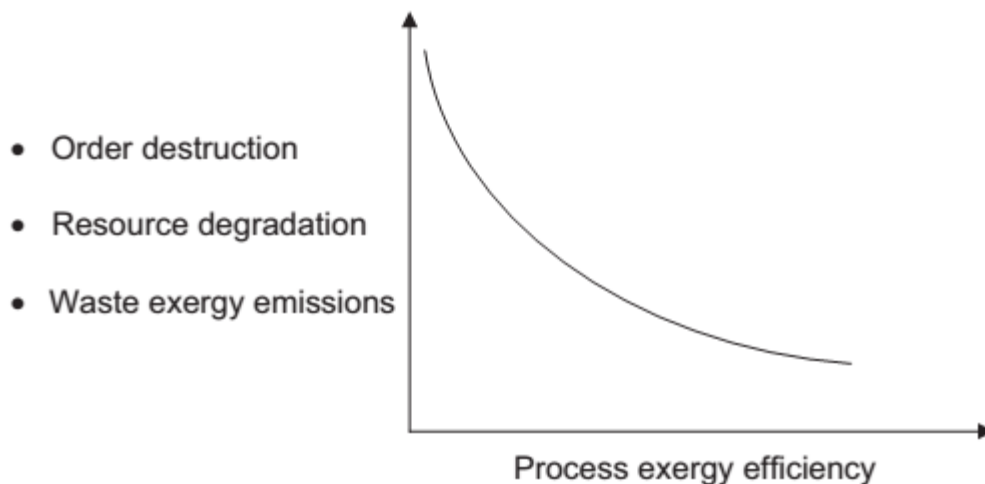
De acuerdo a Rosen, et al (2008), *“...The relations between exergy and the environment may reveal the underlying fundamental patterns and forces affecting environmental changes, and help researchers deal better with environmental damage... Within the scope of exergy methods, such activities lead to increased exergy efficiency and reduced exergy losses (both waste exergy emissions and internal exergy consumptions)”*.

La reducción del impacto medioambiental asociado a un proceso que experimenta incrementos en la eficiencia de la exergía, se representa en la figura (1), basada

<sup>2</sup> ¿Qué ocurre con la exergía cuando el sistema está en equilibrio? Si esta es el trabajo útil mínimo necesario para un estado particular del sistema con base a un referente de equilibrio termodinámico, se concluye que la exergía será cero cuando se esta en dicho equilibrio.

en Rocen y Dincer (1997). En ella se destacan tres fases del daño ambiental correspondientes a niveles de eficiencia exergetica, como el desorden ambiental dado que la exergía es también una medida del orden de un sistema; la degradación de los recursos, para la cual el análisis de exergía propone aumentos en la eficiencia o el uso de recursos externos de exergía (como la energía solar); y por último la emisión de residuos de exergía, la cual constituye en la literatura una de las más importantes amenazas al medio ambiente, para evitar de manera importante esta clase de daño los esfuerzos en procurar la eficiencia de exergía deben ser los mayores posibles.

**Figura (1): Daño Ambiental vrs Eficiencia Exergetica**

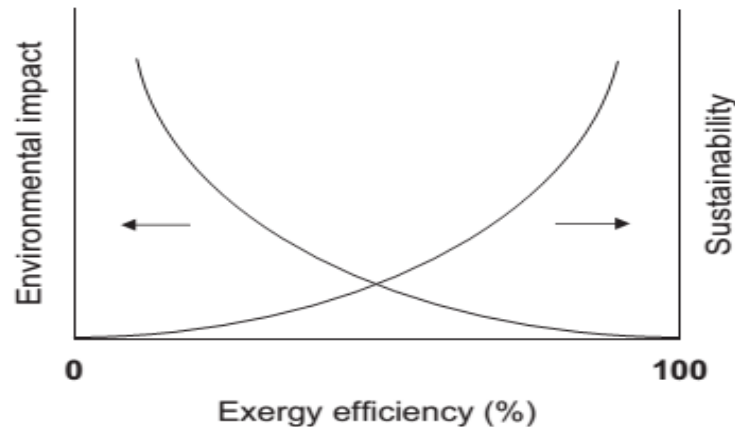


**Fuente:** Tomado de Rosen et al (2008)

Por otro lado, el desarrollo sostenible de un sistema económico depende con mucho de la sostenibilidad de los recursos y esta sostenibilidad, a su vez, depende de la eficiencia con la que son utilizados, (Rosen et al, 2008). Tal es el enlace entre la exergía y el uso de un sistema productivo lo menos afectante posible del sistema natural. Tal como expone este autor, “.. *Exergy methods are essential in improving efficiency, which allows society to maximize the benefits it derives from its resources while minimizing the negative impacts (such as environmental damage)*..”. la consideración del impacto de la exergía sobre el medio ambiente y la sostenibilidad del mismo puede ser apreciado en la grafica (2). En efecto, si la eficiencia exergetica es del 100% tal enfoque sugiere que el impacto ambiental es nulo y la sostenibilidad es infinita (Cornelissen 1997); si, por el contrario, no hay eficiencia exergetica, el impacto ambiental es infinito y la sostenibilidad del recurso es nula. De lo anterior puede colegirse que existe un

nivel de eficiencia exergetica para el que se genera un equilibrio entre impacto ambiental y el nivel de sostenibilidad.

**Figura (2): Impacto Ambiental y Eficiencia Exergetica**



**Fuente:** Tomado de Rosen et al (2008)

### ***La Exergía y la Economía***

En Dincer (2003), se desarrolla una importante revisión de los distintos campos de investigación en los que la exergía, y con ella la termodinámica misma, resultan especialmente útiles. En el caso de la economía, plantea, que este concepto se empieza a utilizar regularmente en la macroeconomía para considerar la depreciación de los recursos y los efectos medioambientales de procesos productivos, en donde resulta importante la ejecución de un impuesto basado en la pérdida de exergía. En microeconomía, por su parte, dicho concepto complementa el análisis costo-beneficio con el propósito de mejorar las asignaciones de recursos; de hecho, lo que en microeconomía se conoce como proceso de minimización del costo en la teoría de la producción, en el caso de la exergía se transformaría el problema en la minimización de la pérdida de exergía asociada al proceso productivo, lo que redundaría necesariamente en un impacto medio ambiental menor. El autor enfatiza que la formación de impuestos basados en la pérdida de exergía es una de las maneras más adecuadas de vincular el concepto de exergía a la economía, y es ahí donde se encuentra la base de la llamada termo-economía, y su particularmente dinámico crecimiento en los últimos años. Por otro lado, hace mención a un elemento que sustenta la importancia de este concepto: según el autor, los mercados energéticos no generan condiciones para que los precios reflejen las verdaderas dinámicas de los recursos, y tal situación hace que estos precios no sean referentes adecuados para la planificación política. Cuando la exergía es involucrada, los recursos pasan a ser considerados



en su valor físico, y este método de fijación de los precios permite procurar tecnologías más eficientes.

Sobre el tema particular de los impuestos basados en la pérdida de exergía, se destacan los trabajos de Santarelli (2004) en los que se llega a una representación matemática de los dichos impuestos con base en la exergía destruida de un proceso productivo. Resulta importante anotar que la forma del impuesto recae en buena medida según las consideraciones que se hagan sobre el proceso productivo y cómo en este es utilizado el recurso energético (Dincer 2003).

### **La Paradoja Verde y la Exergía**

Propuesta en 2008 por el economista alemán Hans-Warner Sinn, la llamada desde entonces Paradoja Verde plantea básicamente que la tendencia política y económica de llevar a cabo prácticas ambientales induce a los productores de recursos no renovables contaminantes, como los combustibles fósiles, a anticiparse aumentando sus tasas de extracción de recursos y aumentando, con ello, las emisiones globales de contaminantes como CO<sub>2</sub>, el efecto por tanto sería el de un daño ambiental mayor (Sinn 2008). Desde entonces, distintos autores han dirigido su interés en el tratamiento de esta paradoja, ya sea desde el análisis de impuestos a los productores de combustibles fósiles (Ploeg y Withagen 2012), desde el examen de los efectos de subsidios a los productores de biocombustibles (Grafton et al 2012) y (Ploeg 2011).

Si bien la mayoría de trabajos desarrollados sobre esta paradoja son de naturaleza teórica, explicable en razón al carácter de novedad de la temática, puede destacarse el trabajo de Di Maria et al (2013), en el cual se propone el primer test empírico sobre la existencia de la paradoja verde. Usando datos de precios, imputs de calor de las plantas de EEUU y los contenidos de azufre del carbón, los autores encuentran un decrecimiento de los precios paralelo a un aumento de los niveles de azufre, indicativo del cumplimiento de la hipótesis de la paradoja verde.

La literatura sobre esta nueva temática en la economía ambiental no es muy amplia, pero hasta ahora no se ha llevado a cabo, según la revisión realizada hasta ahora de literatura, un estudio que parta de consideraciones de exergía para el tratamiento de la paradoja. Si la exergía impone como tal un uso eficiente de los recursos no renovables con arreglo a un impacto ambiental mínimo y, como exponen Rosen, et al (2008) la pérdida de Exergía se refleja entre otras cosas en la emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente, un uso exergético de los combustibles fósiles podría llegar a mitigar y reducir tanto sus tasas de extracción como el nivel de emisiones generadas al ambiente. De hecho, si tales condiciones se contemplan resultaría verosímil asumir que la paradoja verde misma no se mantendría, o que serían otras las condiciones para su mantenimiento. Tal es una de las hipótesis centrales del presente trabajo de tesis.

### 3. Planteamiento del modelo.

El presente modelo se basa en los trabajos de Ploeg y Withagen (2012) en el caso de la paradoja Verde, y en Santarellin (2008), Rosen, Dincer et al (2008), y Connelly, y Koshland, C (1997) en el caso del concepto de exergía vinculado a modelos económicos. El propósito fundamental del planteamiento teórico consiste en exponer las condiciones en que puede ser vinculada la exergía con el fin de mostrar la permanencia de la paradoja verde.

El modelo se compone de dos bienes producidos, los de combustibles fósiles y, otro distinto, el de una tecnología menos agresiva con el medio ambiente y sustentada en un recurso renovable.

#### Premisas básicas del modelo

- a. Ambos bienes generados, recursos fósiles no renovables y recursos renovables, son sustitutos perfectos. Cuando se agota el combustible fósil, los productores inician la producción del bien sustituto.
- b. La energía extraída es la misma usada para la producción de bienes de consumo.
- c. La tasa de extracción se encuentra ajustada por el nivel de sostenibilidad exergética del recurso.
- d. Hay una sostenibilidad del consumo del recurso no renovable en el sentido de la exergía.
- e. La exergía es una variable exógena y, por tanto, obedece a fuerzas que no pretende explicar el modelo.

#### *La Exergía en el proceso productivo*

De acuerdo a Connelly, y Koshland, C (1997), la eficiencia con respecto a la exergía de un proceso productivo de consumo de combustibles fósiles, debe considerar tanto la exergía que entra en el proceso como la que es destruida. De esta forma se define la tasa de agotamiento en el consumo del recurso mediante la expresión [2]

$$D_p = \frac{E_{xd}}{E_{in}} [2]$$

Donde  $E_{xd}$  indica la Exergía destruida en el proceso y  $E_{in}$  representa la exergía que es insumo. La eficiencia en términos de exergía se establece en relación con este nivel de agotamiento como en [3]

$$\varphi = 1 - D_p [3]$$

Resulta importante considerar así la sostenibilidad del recurso en términos de exergía, como se presenta en la ecuación [4].

$$SI = \frac{1}{D_p} [4]$$

Tomando la ecuación (3) en términos de la eficiencia exergética se tiene la ecuación [5] para el nivel de sostenibilidad del consumo del recurso,

$$SI = \frac{1}{1-\varphi} [5]$$

De manera tal que aumentos en el nivel de exergía generan una mayor sostenibilidad del recurso energético utilizado, en este caso como combustible fósil.

#### *El uso de la energía y la Exergía en el modelo*

Sea S el stock del combustible fósil y E la tasa de extracción de dicho combustible así como también el nivel de uso de dicho recurso energético. De esta manera, dado que el combustible es agotable, se tiene que

$$\dot{S} = -\frac{E}{SI} = -(1 - \varphi)E ; 0 < \varphi < 1 \quad [6]$$

La ecuación (5) plantea que el cambio en el stock de combustible depende de manera inversa de la tasa de Extracción *ajustada* por el nivel de sostenibilidad del consumo del recurso. Si la exergía en el consumo de la energía crece, se espera que la sostenibilidad del recurso sea mayor y, con ello, la tasa de cambio del stock se reduzca, (Connelly, y Koshland, C 1997). Hay un aspecto interesante en la ecuación (5), si el nivel de exergía es del 100%, el nivel de sostenibilidad del recurso será tan alto que la tasa de cambio del stock del combustible será nula; por otro lado, si la exergía es nula, la tasa de cambio responderá de manera completa a la tasa de extracción del recurso sin ajuste exergético, siendo igual al modelo propuesto por Forester (1980).

La energía es utilizada para la producción de bienes y servicios que generan un nivel de utilidad, pero también estos generan un nivel de polución que genera por su parte una pérdida de utilidad en el agente consumidor. De esta manera se tienen las siguientes condiciones de partida,

$$C = C(\varphi E) ; \quad (C' > 0 \text{ y } C'' < 0) \quad [7]$$

$$P = P((1 - \varphi)E) ; \quad (P' > 0 \text{ y } PP'' > 0) \quad [8]$$

De esta manera, la función de utilidad se expresa como

$$U = U(C, P) \quad ; \quad (U_C > 0, U_P < 0, U_{PP} < 0, U_{PC} = 0) \quad [9]$$

## El Problema

El problema será representado como

$$\max \int_0^T U[C(\varphi E), P((1 - \varphi)E)] \quad \text{s. a } \dot{S} = -(1 - \varphi)E, \quad S(0) = S_0 \quad \text{y } S(T) \geq 0 \quad ^3$$

El hamiltoniano asociado a este problema tendrá la forma

$$H = U[C(\varphi E), P((1 - \varphi)E)] - (1 - \varphi)\lambda E \quad [10]$$

Al proceder a maximizar el hamiltoniano con respecto a E como la variable de control elegida, se tiene que

$$\frac{\partial H}{\partial E} = U_C \varphi C'(E) + U_P (1 - \varphi) P'(E) - (1 - \varphi)\lambda = 0 \quad [11]$$

$$0 \quad \varphi U_C C'(E) + (1 - \varphi) U_P P'(E) - (1 - \varphi)\lambda = 0$$

A menos que  $\varphi > 1$ , en razón de las condiciones [7] [8] y [9] la derivada segunda del hamiltoniano indica que E maximiza el problema planteado.

## Trayectorias Óptimas de Tiempo de las Variables

Puede notarse que de la ecuación [11], E se encuentra en función de  $\lambda$ , de manera que se necesita la condición de transversalidad y el Principio del Máximo, para generar el patrón de  $\lambda$ . De esta manera se tiene que,

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial S} = 0 \quad (\text{por lo que } \lambda(t) = c, \text{ una constante arbitraria})$$

Así, la condición de transversalidad, plantea que debe cumplirse

$$\lambda(T) \geq 0 \quad S(T) \geq 0 \quad \lambda(T)S(T) = 0 \quad [12]$$

De acuerdo a Chang (1998), debe empezarse por solucionar para  $\lambda(T) = 0$ , de manera que se tienen las siguientes condición,

$$\text{Si } \lambda(T) = 0 \quad \text{y } \lambda(t) = c \rightarrow \lambda(t) = 0 \quad \text{dado que } c = 0 \quad [13]$$

Reemplazando la condición [11] en [12], se tiene

$$\varphi U_C C'(E) + (1 - \varphi) U_P P'(E) = 0 \quad [14]$$

<sup>3</sup> La literatura sobre la paradoja verde normalmente considera horizontes de tiempo infinito. En este trabajo, por el contrario, se toma un horizonte de tiempo finito, T, para reflejar el hecho que la planificación de la extracción con base en la exergía exige consideraciones temporales de sostenibilidad del recurso.

La cual tiene en principio solución para la trayectoria de tiempo de  $E$ . Dado que  $E^*$  es independiente del tiempo, de acuerdo a Forester (1980), este se toma constante<sup>4</sup> y, de esta manera, se tiene que

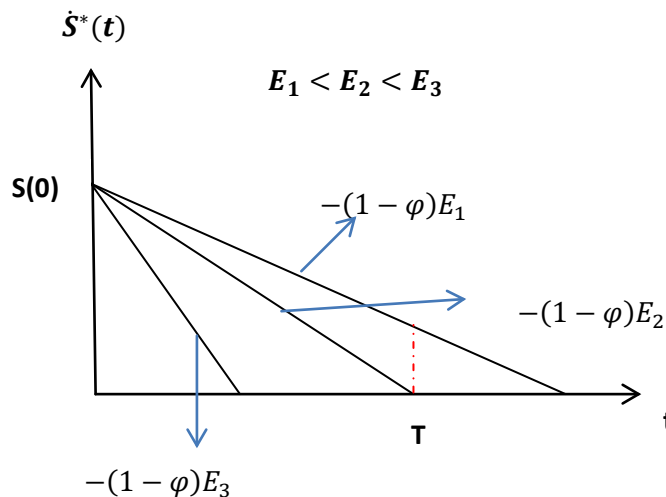
$$E^*(t) = (1 - \varphi)E^* \quad [15]$$

Integrando directamente y reemplazando la condición terminal de la trayectoria ( $S(T)=k$ ) se tiene la ecuación [16], la cual puede ser analizada de una manera cualitativa mediante la figura (1).

$$\text{Así, } \dot{S} = -(1 - \varphi)E \Rightarrow S^*(t) = S_0 - (1 - \varphi)E^*t \quad [16]$$

En dicha figura se asumen tres niveles distintos de tasas de extracción de combustibles. A un nivel de  $(1 - \varphi)E_3$  resulta posible que la condición de  $S(T) \geq 0$  para el periodo de tiempo estipulado no se cumpla y sea, incluso, negativo. Al nivel  $-(1 - \varphi)E_2$ , por su parte, el recurso es agotado completamente para el periodo de planificación; para el nivel  $-(1 - \varphi)E_1$ , una parte del stock del combustible fósil se conserva para el periodo de planificación.

**Figura (3): Tasas de Extracción Óptimas**



El anterior análisis de la figura (3) muestra un hecho importante derivado de la inclusión de la exergía: existe un nivel de exergía  $\varphi$  para el cual la trayectoria del stock de combustible permanece una vez termina el proceso de planificación de la extracción. La exergía, por tanto, manteniendo fijo el nivel de consumo energético  $E$ , puede hacer que el recurso no se agote en un periodo determinado de planificación, además que puede reducir la tasa de extracción del combustible. Esta misma grafica puede para niveles distintos de eficiencia en exergía  $\varphi$  dejando

<sup>4</sup> Se asume de esta manera pues para el planteamiento del problema no es considerada tasa de descuento alguna. Sin embargo puede reformularse para tal propósito.

constante la tasa de extracción  $E$ ; para dicha tasa entonces el análisis sigue siendo el mismo, existirá un nivel de eficiencia para el que el nivel de recurso no se agote completamente.

Si, por otro lado, se pretende un agotamiento completo del recurso durante el periodo de planificación, la tasa óptima de extracción tendrá la siguiente forma, a partir de la ecuación [16]. Al incrementarse la exergía del sistema productivo, el nivel de sostenibilidad del consumo de la energía se incrementa y, por lo tanto, la tasa de extracción puede ser más elevada para poder agotar más rápidamente el recurso dado el nivel de eficiencia exergetica.

$$E^* = \left(\frac{1}{1-\varphi}\right) \frac{S_0}{T} [17]$$

Si el nivel de exergía es tal que puede generarse un remanente en el stock de combustible, ¿cómo afecta esta condición la Paradoja Verde? ¿La exergía estimularía más fácilmente el cambio hacia tecnologías renovables, bajo consideraciones de costos, y en esa medida se agravaría o no el efecto nocivo sobre el medio ambiente que sugiere la paradoja?

Se pueden establecer, por lo menos, las siguientes consideraciones

- Existe un nivel de eficiencia Exergetica  $\varphi$  para el que la trayectoria óptima de extracción del combustible fósil no redunde en su completo agotamiento.
- Si este nivel de eficiencia es comparado con algunas de las variables que pueden mediar en la decisión de los productores de combustibles fosiles, como precios y costos, la exergia se torna entonces en un criterio para las decisiones de extracción y, por lo tanto, de traspaso a la producción de otro tipo de bienes.
- En línea con la exergia como criterio, según la ecuación [17], si los productores de combustibles fósiles anticipan las tendencias verdes de la economía mundial, para pretender aumentar completamente el recurso tendrían, en principio dado el periodo de planificación, que aumentar sus niveles de eficiencia exergéica lo cual desde luego comporta consideraciones de costos. De esta manera, en un panorama de eficiencia exergetica, la anticipación que es clave para la Paradoja Verde no es tan expedita y tan fácil de llevar a cabo.

### *Replanteamiento de la paradoja Verde*

De acuerdo a los planteamientos teóricos de Ploeg y Withagen (2012) para el problema de la paradoja verde, y asumiendo las mismas ecuaciones anteriores para la eficiencia en términos de exergia, el planteamiento del problema de la demostración de las condiciones de cumplimiento de la paradoja verde puede ahora ser reformulada mediante la siguiente ecuación, de planificación de bienestar social.

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} [u(\varphi q(t) + x(t)) - G(s(t))q(t) - bx(t) - D\left(E_0 + S_0 - \left(\frac{1}{1-\varphi}\right)s(t)\right)] dt^5$$

[18]

En esta ecuación, la exergía entra en la función de daño ambiental de una manera distinta, en razón a que la variable  $s(t)$  representa para los autores el stock remanente del combustible fósil en la tierra. Los términos  $q(t)$  y  $x(t)$  representarían las tasas de extracción del combustible fósil y del bio-combustible, respectivamente.  $D$ , representa la función de daño ambiental con las emisiones y el stock de combustible como argumentos principales. El hamiltoniano asociado corresponderá a

$$H(q, x, s, n) \equiv u(\varphi q + x) - G(s)q - bx - D\left(E_0 + S_0 - \left(\frac{1}{1-\varphi}\right)s\right) - nq \quad [19]$$

De esta manera, una exploración de las condiciones de primer orden y la determinación de las trayectorias óptimas de tiempo de las variables conducirían a establecer las condiciones de cumplimiento o no de la paradoja verde en términos de la exergía asociada al proceso económico.

#### 4. Conclusiones y preguntas por responder.

En el anterior trabajo se desarrolló un modelo teórico de uso de energía con polución para, vinculando variables de eficiencia de Exergía, determinar la tasa de extracción óptima de combustible fósil. Se estableció que existe un nivel de eficiencia exergetica que genera una tasa de extracción del recurso cuyo agotamiento no es completo, por lo que los productores de combustibles fósiles tienen mayores incentivos a pasar a la producción de no renovables.

De esta manera se establecieron las bases teóricas para definir la siguiente conjetura: “en un mundo con dinámicas productivas acordes con la Exergía, la paradoja verde no tiene lugar”. Así, se generarían las siguientes líneas de investigación, derivadas de una conjunción entre la Economía Ambiental y la Exergo-Economía con las siguientes preguntas.

- ¿Cuál es el efecto de impuestos basados en la exergía sobre el nivel de emisiones?
- ¿Hasta qué punto deben reformularse las teorías de fiscalización con base en la vinculación de este tipo de impuestos basados en la pérdida de exergía?
- ¿Qué ocurre con los subsidios? ¿se cumple o no la paradoja verde en estos casos?

El modelo anteriormente desarrollado, en su versión simplificada, permite reformularse para responder a las anteriores preguntas.

<sup>5</sup> Para una revisión detallada de este modelo, véase Ploeg y Withagen (2012).

## 5. Referencias.

A.F. Massardo, M. Santarelli, R. Borchiellini (2003). Carbon exergy tax (CET): its impact on conventional energy system design and its contribution to advanced systems utilization. *Energy*, Energy 28. pp. 607–625

Ayres, R.U., Ayres, L.W., Martinas, K., (1998). Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis. *Energy* 23, 355–363.

Borchiellini R, Massardo AF, Santarelli M. An analytical procedure for the carbon tax evaluation. *Energy Conversion and Management Journal* 2000;41:1509–31.

Bryant, J. A Thermodynamic theory of economics (2007). *Int. J. Exergy*, 4, 302-337.

Connelly, L., Koshland, C.P., 1997. Two aspects of consumption: using an exergy-based measure of degradation to advance the theory and implementation of industrial ecology. *Resources, Conservation and Recycling* 19, 199–217.

Cornelissen, R.L., (1997). Thermodynamics and sustainable development. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.

Corrado Di Maria Ian Lange Edwin van der Werf (2013). Should we be worried about the green paradox? Announcement effects of the Acid Rain Program. *European Economic Review* 18 april 20013.

Frederick van der Ploeg

Frederick van der Ploeg (2011). Economics of sustainability transitions: Second-best climate policy, Green Paradox, and renewables subsidies. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1. Pp. 130-134.

Frederick van der Ploeg y Cees Withagen (2012). Is there really a green paradox? *Journal of Environmental Economics and Management*. 64. Pp 342-363.

Georgescu-Roegen (1975). Energy and Economic Myths. *Southern Economic Journal* Vol. 41, No. 3, Jan., 1975.

Göran Wall (1986). Exergy – a Useful Concept. *Physical Resource Theory Group*. 3rd edition.

Hans-Werner Sinn (2008). Public policies against global warming: a supply side approach. *Int Tax Public Finance*. Numero 15:pp 360–394



Ibrahim Dincer (2002). The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy*, Volume 30, Issue 2, January, pp 137–149.

Marc A. Rosena, Ibrahim Dincer y Mehmet Kanoglu (2008). Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy* 36, pp. 128–137.

R. Quentin Grafton ,Tom Kompas y Ngo Van Long (2010). Biofuels Subsidies and the Green Paradox . *ENERGY AND CLIMATE ECONOMICS*. CESIFO WORKING PAPER NO. 2960.

Richard A. Gaggioli, y William J. Wepfer (1980). Exergy economics: I. Cost accounting applications. *Energy* Volume 5, Issues 8–9, August–September 1980, pp 823–837.

Robert U Ayres, Leslie W Ayres, Benjamin Warr (1998). Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998. *Energy*, Volume 28, Issue 3, March 2003, Pages 219–273

Rosen, M.A., Dincer, I., (1997). On exergy and environmental impact. *International Journal of Energy Research* 21, 643–654.

Rosen, M.A., Dincer, I., 2003. Thermo-economic analysis of power plants: an application to a coal-fired electrical generating station. *Energy Conversion and Management* 44, 2743–2761.

Rosen, M.A., Dincer, I., 2003. Thermo-economic analysis of power plants: an application to a coal-fired electrical generating station. *Energy Conversion and Management* 44, 2743–2761.

S.C. Kaushik V. Siva Reddy S.K. Tyagi (2011). Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 15, Issue 4, May 2011, pp 1857–1872

Santarelli M (2004). Carbon exergy tax: a thermo-economic method to increase the efficient use of exergy resources. *Energy Policy*. Vol 32 February Pp 413–427

Santarelli M, Borchiellini R, Massardo AF(1999). Carbon tax vs CO<sub>2</sub>sequestration effects on environomic analysis of existing power plants. In: Ishida M, Tsatsaronis G, Moran MJ, Katoka H, editors. *ECOS'99*. Tokyo: ECOS;. p. 287–93.

Wepfer, W.J., Gaggioli, R.A., (1980). Reference datums for available energy. In: Gaggioli, R.A. (Ed.), *Thermodynamics: Second Law Analysis*. ACS Symposium Series 122, Washington, DC, pp. 77–92.

Zhang, M., Reistad, G.M., (1998). Analysis of energy conversion systems, including material and global warming aspects. *International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research* 1, 45–65.

