UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

La energía como factor fundamental en el proceso económico

Yormy Eliana Melo Poveda

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Humanas y Económicas

Departamento de Economía

Medellín, Colombia

2013

La energía como factor fundamental en el proceso económico

Yormy Eliana Melo Poveda

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de

Magíster en Ciencias Económicas

Director (a):
Oscar Gonzalo Manrique Díaz, Máster en Economía
PhD (C)

Línea de Investigación:
Economía Ecológica
Grupo de Economía y Medio Ambiente

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Humanas y Económicas
Departamento de Economía
Medellín, Colombia
2013

Lo que es eterno no puede evolucionar (cambiar); la evolución constituye un rasgo específico de lo que nace y muere. En otras palabras, la evolución es el proceso que liga el nacimiento y la muerte: es la vida en el más amplio sentido de la expresión; da fe del hecho de que hasta el universo en su conjunto debe tener vida efímera entre Creación y Calor Muerto si ha de ser una entidad evolutiva tal como lo describe la Ley de la Entropía clásica.

Nicholas Georgescu-Roegen

.

Agradecimientos

Deseo expresar mis agradecimientos a todas aquellas personas que aportaron vigorosamente a la realización de esta investigación. Al profesor Oscar Gonzalo Manrique Díaz, director de esta tesis, le agradezco por su acompañamiento y orientación para la configuración de este trabajo, su estimulo por la investigación siempre fue parte fundamental para continuar en este proceso de formación académica. Así mismo, a los integrantes del Grupo de Investigación Economía y Medio Ambiente (GEYMA) por sus instrucciones y enseñanzas.

Un agradecimiento especial merecen mis padres y hermanos, por el apoyo a cada instante en medio de la distancia geográfica que nos separa. Igualmente, para mis amigos y compañeros por su paciencia, comprensión y motivación para el desarrollo de esta disertación.

Resumen

Desde la prehistoria, la energía en sus diferentes formas ha estado fuertemente vinculada al desarrollo y evolución de la vida del hombre. De ahí que sea relevante realizar una mirada histórica sobre el papel que estos han desempeñado, con el fin de resaltar dicha relación y el impacto del uso de las diferentes fuentes de energía en los procesos económicos que se llevan a cabo. La hipótesis que se asume es que la energía es un factor que explica el proceso de crecimiento económico que se ha registrado especialmente desde los inicios de la Revolución Industrial. Con esta revisión teórica y conceptual, se llega a la conclusión de que los recursos energéticos constituyen la base del proceso económico y que funciona como complemento de los otros factores productivos, capital y trabajo.

Palabras clave: Crecimiento económico; Energía; Recursos Naturales; Proceso de Producción; Sociedad; Economía Ecológica.

Abstract

From prehistoric times, energy in its various forms has been closely linked to the development and evolution of human culture. Hence, it is important to provide an historical perspective on the role that these resources have played, in order to highlight the relationship and the impact of using different energy sources in the economic processe. Our hypothesis is the assumption that energy is a factor which explains the process of economic growth that was recorded, especially since the beginning of the Industrial Revolution. Employing a theoretical and conceptual review, it is concluded that the energy resources are the basis for economic process, and works as a complement to other factors of production, such as capital and labor.

Keywords: Economic growth; Energy; Natural Resources; Production Process; Society; Ecological Economics.

Contenido

Introducción 1

Capítulo 1..... 6

Energía: antecedentes históricos y su papel en la evolución de la sociedad y la economía 6

1.1 Evolución de la humanidad y su relación con la energía: 8

una breve mirada desde la prehistoria 8

1.2 Inicios de la economía de origen mineral (Revolución Industrial) 13

1.3 La era de la electricidad y el petróleo 23

1.3.1 La energía eléctrica en Estados Unidos 24

1.3.2 La era del petróleo..... 29

1.3.3 Análisis del consumo energético del hombre desde la prehistoria 36

1.3.4 Panorama actual y futuro sobre la producción y consumo de energía 38

Capítulo 2..... 50

La energía en el marco conceptual de la economía clásica y neoclásica 50

2.1 El capitalismo agrícola en Inglaterra 52

2.2 La energía en el marco conceptual de la teoría económica 53

clásica..... 53

2.3 La energía en el marco conceptual de la teoría económica neoclásica..... 60

2.4 Reflexiones 67

Capítulo 3..... 70

La energía en el proceso económico..... 70

3.1 La economía biofísica y las Leyes de la Termodinámica..... 71

3.1.1 Economía biofísica..... 73

3.2 La energía como factor fundamental en el proceso económico..... 80

Capítulo 4..... 87
Estado actual del debate en la frontera del conocimiento de la economía..... 87
4.1 Energía y sociedad 87
4.2 La energía como factor fundamental de producción y como determinante de la riqueza..... 89
4.3 La exergía y su relación con el proceso de producción..... 94
4.3 Causalidad entre la energía y el crecimiento económico..... 95
4.4 Los recursos energéticos como factores de producción en Colombia..... 97

Conclusiones y reflexiones 99
Bibliografía 106

Índice de Figuras

Figura 1.1 Potencia de los principales motores 21
Figura 1.2 Composición de la energía primaria de Estados Unidos (1850-2010)..... 33
Figura 1.3 Consumo energético diario per cápita en el tiempo 36
Figura 1.4 Oferta de energía primaria mundial en 2011..... 39
Figura 1.5 Consumo mundial de energía por regiones (2000-2012)..... 42
Figura 1.6 Participación relativa del consumo energético en 2012 43
Figura 1.7 Proyección del consumo mundial de energía primaria (2013-2035) 45

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Consumo estimado del carbón en Reino Unido 17
Tabla 1.2 Producto Nacional Bruto (PNB) y consumo de energía en Estados Unidos (1890-1980)..... 28

Introducción

La energía aunque parece a simple vista un concepto eminentemente físico, definida como la capacidad de hacer un trabajo, representa efectivamente el proceso de creación de riqueza material y tiene una estrecha relación con el progreso social. La historia muestra que la evolución de la humanidad y la economía han estado determinadas particularmente por la disponibilidad de los recursos naturales y energéticos.

Desde la prehistoria con los homínidos y su posterior evolución a *homo sapiens,* el principal interés ha sido la búsqueda de energía, inicialmente en los alimentos que obtenían a través de la recolección, la caza y la pesca, y sin el apoyo de herramientas, es decir, la fuerza estaba provista por sus propios músculos y el fuego era la única fuente extrasomática de energía de aquel entonces. En la medida que fue transcurriendo el tiempo, la población creció y las necesidades del hombre se incrementaron y coaccionaron el ingenio de las sociedades para satisfacer sus requerimientos. Producto final de la abundancia de recursos naturales y el conocimiento del hombre, surgieron en diferentes épocas, las dos grandes revoluciones tecnológicas de la humanidad, la Revolución Agrícola y la Industrial.

En la historia de la humanidad se ha revelado que el ingenio del hombre no ha encontrado límites, de hecho continuamente ha elaborado diversos instrumentos que facilitaron las labores de las sociedades. Este proceso fue lento, pero a través del tiempo el hombre tenía a su disposición más recursos energéticos que podía

aprovechar con el desarrollo tecnológico el cual amplificaba el trabajo del ser humano, y los procesos productivos resultaban más eficientes dado que se requería menor trabajo e insumos para obtener un producto. De lo anterior se connotan dos elementos esenciales: de un lado, los recursos naturales y energéticos constituyen la base para la creación de herramientas tecnológicas, del otro, todo lo que conforme progreso tecnológico en forma de máquinas, equipos, entre otros, es fundamental en el proceso productivo y funciona como complemento de la energía.

Sin embargo, el crecimiento vertiginoso de los países industrializados, luego de la segunda revolución tecnológica de la humanidad, no fue explicado a cabalidad por las escuelas de economía clásica y neoclásica, incluso desconocieron la esencia que lo promovió como fue la mayor disponibilidad y uso de recursos naturales y energéticos.

Si bien la predominante escuela neoclásica, se interesa por buscar los factores que determinan la riqueza, su interpretación ha omitido el papel que desempeña la energía como factor productivo y sólo lo ha considerado como un insumo intermedio. Tal omisión de los recursos naturales y energéticos se debe a la concepción mecánica que prevalece sobre el proceso económico, la misma señala que todo insumo que entra en el proceso de producción debe salir en la misma cantidad y calidad, ignorando los cambios cualitativos que sufren los insumos a través del proceso. Este principio considera sólo la Ley de Conservación de la Materia e ignora la Ley de la Entropía, esta última, relevante porque contempla la escasez de los recursos y su degeneración a través del proceso de producción.

Por esto las disertaciones sobre las debilidades de la teoría económica estándar no han dado espera, las críticas y propuestas provienen peculiarmente de otras ramas del conocimiento, que han planteado perspectivas coherentes con el entorno natural. Algunas no son recientes, se iniciaron con la aparición de la termodinámica en el siglo XIX y se han establecido principalmente por académicos de las ciencias naturales como Podolinsky (1880), Soddy (1884) y Geddes (1921). Ellos analizaron la relación entre el sistema económico y los flujos de energía en la

sociedad y sentaron las bases para la estructuración posterior de la denominada economía ecológica.

En la década de los setenta del siglo XX, Nicholas Georgescu-Roegen consolidó la Bioeconomía o comúnmente llamada Economía Ecológica. Su principio fundamental es que el sistema económico está inmerso en la naturaleza y, por tanto, se rige por sus leyes. Desde entonces innumerables estudios conceptuales y empíricos aparecieron con el ánimo de mostrar y hacer evidente las limitaciones de la disciplina económica en cuanto a la asignación ineficiente que se le está dando a los recursos porque no se está considerando a las generaciones futuras. No obstante, el alcance de la economía ecológica en el debate académico, ha sido insuficiente porque no ha logrado el propósito, en la teoría convencional, de replantear seriamente la base sobre la que se sustenta la economía.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es mostrar por medio de una perspectiva histórica y conceptual, el fundamento del sistema productivo desde que hay vida en el planeta tierra: la energía. Particularmente se trata de poner en manifiesto los elementos que relacionan la evolución de la sociedad y la economía con la disponibilidad y uso de la energía. De manera que la hipótesis de la que se parte es que la energía es un factor que explica el proceso de crecimiento económico que se ha registrado especialmente desde los inicios de la Revolución Industrial.

Enmarcados en esta hipótesis se realiza un análisis y descripción de la historia de la humanidad con el fin de evidenciar que la energía, en sus diferentes formas, siempre ha estado asociada con la evolución de las especies que habitan el planeta. El objeto es mostrar que la energía útil no sólo resulta fundamental para la realización del proceso económico, sino también para el desarrollo de la humanidad y las estructuras sociales.

Con este fin, el presente trabajo tiene como metodología realizar un análisis que integra aspectos históricos, conceptuales y evidencia empírica para visualizar cómo y porqué la energía ha sido indispensable y ha impulsado al complejo aparato

productivo de la economía. Además de analizar la forma en que se ha incorporado al marco teórico de las escuelas económicas tradicionales.

Esta tesis no efectúa un tratamiento formal en términos matemáticos o estadísticos, pero sí un análisis de carácter histórico y teórico, recogiendo los postulados de la economía biofísica y construyendo argumentos que muestren la relación existente entre el crecimiento de la economía y la energía como un factor productivo; el enfoque de esta tesis es histórico-deductivo. Con todo, esta disertación se compone de cuatro capítulos y de las conclusiones y reflexiones.

El primer capítulo hace referencia a la energía: antecedentes históricos y su papel en la evolución de la sociedad y la economía. Éste contiene los aspectos desde la prehistoria donde la energía tuvo un papel central en el desarrollo del hombre y en el establecimiento de sociedades cada vez más organizadas e ingeniosas, pasando por la primera gran revolución tecnológica de la humanidad como fue la Agrícola, luego por el uso de fuentes de energías renovables como la eólica e hidráulica, hasta llegar a la era del carbón y posteriormente del petróleo y la electricidad.

En el segundo capítulo se discute sobre la forma en que la energía se ha analizado en el marco conceptual de la economía clásica y neoclásica. Se explica la concepción de producción económica que predominaba en cada una de estas escuelas, así como también se contrasta con la teoría fisiócrata, la cual a pesar de estar en un contexto de afluencia de recursos naturales y energéticos, consideraba a la tierra como un factor fundamental de la economía y reconocía implícitamente a la energía dentro del marco productivo.

Acorde con lo anterior, el tercer capítulo consiste en mostrar que la energía es el factor fundamental en el proceso económico desde el punto de vista material. Éste aborda las leyes de la termodinámica, que están asociadas con el concepto de energía para así comprender que es vital considerarlas en el planteamiento económico ya que éstas rigen a todo lo que está inmerso en el globo terrestre. En este capítulo se indica cómo desde la aparición de la termodinámica como una

ciencia moderna, los científicos han integrado la explicación de la economía con otras áreas del conocimiento y, de esta forma, han sido capaces de ilustrar adecuadamente los fenómenos reales y particularmente los procesos sociales y económicos. En este contexto, se hace hincapié en los fundamentos de la economía ecológica porque expone desde otra alternativa cómo debe considerarse el proceso económico.

El cuarto capítulo se compone del estado actual del debate en la frontera del conocimiento económico, en el cual se muestra el cúmulo de desarrollos empíricos y de fundamentadas reflexiones teóricas que han vinculado a la energía con el desarrollo de la sociedad y lo han incluido como un factor más, junto con el capital y el trabajo, en el proceso productivo.

Consecuentemente se consignan las conclusiones y reflexiones de este recorrido histórico, conceptual y empírico. En éste se discute que cuando se entienda a la energía como el factor fundamental del proceso económico, entonces los economistas comprenderán porqué sus teorías deben articularse con áreas como la ecología, la biología, entre otras, para así maximizar los beneficios en función de los límites naturales.

Capítulo 1

Energía: antecedentes históricos y su papel en la evolución de la sociedad y la economía

La evolución de la humanidad desde la era prehistórica hasta la actualidad ha estado marcada fundamentalmente por la lucha para controlar los recursos naturales y los flujos de energía que se derivan de los mismos, con el fin de satisfacer las necesidades básicas del ser humano como alimento, vestido, vivienda y para la producción de bienes y servicios, donde la energía es un factor esencial.

Para entender a la energía como un factor determinante en la historia de la sociedad y la economía, resulta imprescindible comprender este concepto. La energía, en la ciencia física, es definida como la capacidad de hacer un trabajo, es decir, *como un potencial para la transferencia de energía en una dirección específica (desplazamiento en la dirección de la fuerza)* (Kostic, 2007, p. 1). La energía en sí misma existe en una multitud de formas: electromagnética, eléctrica, magnética, nuclear, química, térmica y mecánica.

Según la visión termodinámica, la energía es vista como el factor clave en la historia de la evolución de las especies que habitan en el planeta y en el desarrollo de las grandes civilizaciones, así como lo expresa Smil (2004, p. 549): *los flujos de energía y conversiones sostienen y delimitan la vida de todos los organismos y por*

lo tanto, de todos los superorganismos tales como las sociedades y las civilizaciones.

Desde la prehistoria, la energía en sus diferentes formas ha estado fuertemente vinculada con el desarrollo y evolución de la vida del hombre y la sociedad. De aquí que sea importante referenciar las transiciones de la energía relacionadas con el desarrollo de la especie humana y expuestas principalmente por Smil (2004), donde el paso de una hacia otra, ha sido gracias a la conversión de fuerzas más potentes y en formas cada vez más eficientes de energía, soportada en nuevas técnicas e innovaciones tecnológicas a lo largo de la historia del mundo.

Según Smil (2004) las transiciones de la energía son cuatro. La primera empezó hace más de 300,000 mil años cuando la especie humana pasó de ser *homo erectus* a *homo sapiens* y se extendió hasta el inicio de las sociedades organizadas hace 10,000 años; ésta se desarrolló con el uso de energías extrasomáticas como fue el aprovechamiento y empleo del fuego y la domesticación de los animales de tiro. No pasaron muchos milenios después cuando surgió la segunda transición energética, las sociedades tradicionales sustituyeron su fuerza muscular por ruedas hidráulicas y molinos de viento, que eran motores inanimados sencillos pero bastante útiles para convertir los flujos de agua y viento en energías más potentes. La tercera gran transición de la energía fue la sustitución de la fuerza motriz animada por motores y la sucesión de energías de biomasa por combustibles fósiles, esto ocurrió sólo hace algunos siglos en países europeos inicialmente y pronto se extendió por otro gran número de regiones durante el siglo XX. La última transición de la energía ha estado desarrollándose desde 1882 con el funcionamiento de la primera estación[1] generadora de electricidad del mundo, desde entonces las sociedades han incrementado el consumo de combustibles fósiles indirectamente a través del uso de la electricidad. La fisión nuclear fue otra forma de producir energía que empezó

[1] La primera estación de electricidad del mundo fue establecida tanto en Londres como en Nueva York (las centrales de carbón de Edison) y en Wisconsin, Estados Unidos (la primera central hidroecléctrica) (Smil, 2004, p. 550).

en la década de 1950, así como también aparecieron las turbinas eólicas y las celdas fotovoltaicas creadoras de energía útil (Smil, 2004, pp. 549, 550).

El cambio de una transición a otra, sucedió cuando se desplegaron nuevas tecnologías que permitieron mejorar la eficiencia de la energía, contribuyendo al aumento de la producción de bienes y servicios y en grandes beneficios para la humanidad. El uso de energía en sus diferentes formas, ha sido un eje fundamental para el establecimiento de estructuras sociales y el desarrollo de civilizaciones.

El objeto de este capítulo, entonces, es realizar una mirada histórica sobre el papel que ha desempeñado la energía en la evolución de la humanidad, la sociedad y la economía, desde la era prehistórica hasta la actualidad, segmentándolo en tres secciones diferentes: la primera se denominará *Evolución de la humanidad y su relación con la energía: una breve mirada desde la prehistoria*; la segunda hace referencia a los *Inicios de la economía de origen mineral (Revolución Industrial)*, y la tercera sección corresponde a *la era de la electricidad y el petróleo.*

1.1 Evolución de la humanidad y su relación con la energía: una breve mirada desde la prehistoria

Desde hace 7.5 millones de años se tiene registro del inicio de la bipedalidad en los homínidos y ha sido la evolución más importante para éstos debido a que les permitió caminar erguidos, mover los brazos, tomar el alimento, así como también pudieron liberar los labios y los dientes lo que les posibilitó el desarrollo del lenguaje; esto según Podolinsky (1880) facilitó paulatinamente el aprovechamiento de la energía disponible en la superficie del planeta y desde entonces, la cantidad de energía ya no estuvo en reserva. Estos cambios y actividades especiales exigieron a su vez, mayor consumo de energía del cerebro humano que se incrementó tres veces más que el nivel de los chimpancés (Smil, 1994, p. 15).

El *homo sapiens* surgió en los dos últimos millones de años, se organizó en tribus y formó las primeras sociedades; acudió a la recolección, la caza y la pesca para asegurar su alimento, vivía en función de su energía somática y la única fuente extrasomática se asociaba con el uso del fuego que se utilizaba para calentar y para cocinar, lo cual data de hace 250,000 años (Smil, 2004). El fuego fue un gran descubrimiento en las primeras sociedades porque facilitó el desarrollo e integración social, fue fundamental para aprovechar la energía del medio natural y para la ingesta de alimentos.

El cambio de la recolección a la agricultura migratoria y luego a la sedentaria fue gradual, éste fue un largo proceso. Después de miles de años, el advenimiento de la agricultura permitió avanzar en la provisión de alimentos y por esto se le denominó la primera gran revolución[2] tecnológica en la historia de la humanidad que ocurrió aproximadamente hace ocho mil años antes de Cristo (Cipolla, 1979, p. 196). El inicio de la agricultura data en la región Central de Asia, en donde el crecimiento de la población y el bajo retorno energético de la recolección y la caza, fomentó la necesidad de aprovechar la fuerza de la naturaleza. Con la agricultura las sociedades se van estableciendo en lugares específicos, dejan de ser nómadas y empiezan a apropiarse de objetos ya no móviles, sino fijos como los linderos de tierra. Con esta primera Revolución[3] Tecnológica, la Agrícola, se creó la industria textil, la cerámica y la metalúrgica, además del desarrollo de técnicas de fermentación para la elaboración del pan y la cerveza. Entonces este fue el primer gran progreso del hombre en el dominio del ambiente, dejando de ser cazador-recolector para pasar a ser pastor-agricultor, y como resultado la recolección y cultivo coexistieron por muy largos períodos.

Debido a la intensificación de la agricultura y la gran variedad de actividades que la sociedad debía realizar como limpiar la tierra, plantar, deshierbar, fertilizar, cosechar y procesar los cultivos, en Asia Occidental se aprovechó inicialmente la primera fuente extrasomática de energía mecánica importante, como fue la

[2] La segunda gran revolución tecnológica de la humanidad fue la Revolución Industrial (Cipolla, 1979, p. 196).
[3] Para profundizar en el tema ver Cipolla (1979), Cunningham (2003).

domesticación de animales de tiro registrado hace 4,500 años a.C (Cunningham, 2003). Si bien el uso de la tracción animal aceleró la preparación del terreno, facilitó el transporte y las tareas de procesamiento de cultivos, aún habían dificultades para aumentar la productividad debido a las pocas herramientas; este modelo energético agrícola empezó a extenderse desde el Medio Oriente hacia el Este (Cunningham, 2003).

El posterior desarrollo del arado de hierro y la herradura permitió incrementar la productividad agrícola, así como el hacha y la reja de hierro propició la tala de bosques. Con estas nuevas herramientas se inició la era del uso de la madera para construir máquinas, barcos, carros, casas; también aparecen utensilios como martillos, tenazas, sierras, engranajes, palancas, tornillos, cañas y poleas que multiplicaron la fuerza humana (Cunningham, 2003, p. 53). Aunado al surgimiento de estas invenciones, la población empezó a crecer y se estructuraron sociedades más estables, a lo que se le llamó un modelo energético agrícola avanzado, caracterizado porque la energía estaba provista por la fuerza humana y muscular.

En lo concerniente a tracción animal, los mejores bueyes y caballos podían sostener hasta 500 W,[4] equivalentes a la fuerza muscular de seis a ocho hombres (Smil, 2004, p. 551). Las obras de ingeniería hidráulicas impulsadas por la extensión de la agricultura, desde los valles hacia zonas áridas y semiáridas, en lugares como Egipto, Mesopotamia, Persia e India, requirieron el uso masivo de la tracción animal y fundaron un control centralizado de la energía e instituyeron nuevas clases sociales como la militante, la profesional y los burócratas muy radicales y poco dispuestos al cambio, estos últimos quienes impusieron barreras al progreso de la sociedad (Cunningham, 2003).

Por su parte, Europa Medieval aprendió de la civilización asiática, esta última tenía notable ventaja tecnológica con respecto al resto del mundo al haber creado instrumentos claves para el comercio y la navegación como la brújula, la pólvora y la imprenta. Entonces, el escenario histórico sobre la evolución de la energía se

[4] W es el símbolo de vatio o watt que es la unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades (Tomado de: *The International System of Units*).

torna ahora al continente europeo, que a finales del siglo XV tomó posesión de la mayor parte de los inventos y empezó a utilizarlos con más éxito que las viejas civilizaciones (Schultz, 2001). Los países europeos se apropiaron de innovaciones como el timón, la brújula, la pólvora, el papel, el estribo, los molinos y la imprenta, que luego los transformó, así como lo hizo con el arnés de collera que aumentó la potencia de tiro del caballo, se desarrolló un nuevo arado de hierro y ruedas y se rotaron los cultivos, lo que resultó en un elevado aumento de la productividad agrícola (Cunningham, 2003).

Surgió también en Europa la rueda hidráulica[5] que se había utilizado desde la antigüedad y luego se convirtió en el molino de agua. El uso de esta invención se extendió por la Edad Media, y la sociedad empezó a depender de la fuerza motriz inanimada para una serie de tareas exigentes como la molienda de grano, el aceite prensado, la artesanía para los herreros y alambreros y para los batanes de los fabricantes de paños que eran movidos en lo posible por agua (Schultz, 2001). Los esfuerzos por crear máquinas hidráulicas se centraron en las regiones montañosas, en donde los salarios eran altos y la tracción humana más costosa, es decir, en el centro del sistema europeo (Schultz, 2001).

A partir del siglo XI la fuerza hidráulica se aplicó a una serie de procesos industriales, en especial para abatanar los tejidos. Hacia finales de este siglo se estima que existían casi 50,000 molinos hidráulicos[6] en Inglaterra. Esta rueda fue capaz de bombear el agua de la mina desde 200 metros de profundidad (Schultz, 2001), de mover los martinetes de las forjas y las fraguas de los herreros, las serrerías y las muelas, de triturar los minerales y los glastos, cascar los curtidos y otros materiales, molturar los colorantes, elevar las aguas, fabricar la pasta de papel y mover los tornos (Cipolla, 1979, p. 196). Fue a mediados del siglo XV que

[5] La primera aparición de los motores de agua se referencia hacia el siglo primero antes de Cristo, describiendo su uso en la molienda de granos (Smil, 2004, p. 553), pero tomaron cinco siglos en adoptarse al mundo mediterráneo (Alam, 2006, p. 9).
[6] Dato tomado de Cunningham (2003, p. 53).

este tipo de fuerza podía implementarse en casi todas las máquinas si el volumen de trabajo lo requería.

Clausurando el siglo XII apareció en Inglaterra el molino de viento[7] que fue utilizado como fuerza industrial pero en menor proporción que el agua (Cipolla, 1979). Esta invención se usó principalmente en la molienda de granos y el bombeo de agua, luego su técnica fue mejorando paulatinamente entre finales de la Edad Media y principios de la Moderna, permitiendo el mayor aprovechamiento de la energía del viento, -empleada de forma más efectiva para las grandes travesías marítimas de Europa-.

Hacia el siglo XIV en muchas regiones de Gran Bretaña, particularmente en los grandes centros urbanos,[8] se aprovechó tanto el agua como el viento para los molinos en vez de la fuerza humana y animal, instituyéndose como recursos ampliamente útiles en los diferentes procesos productivos de la época. Sin embargo, el uso de estas dos energías mecánicas tenía límites asociados con la ubicación del recurso y la disponibilidad de agua o viento, que dependía a su vez del clima, lo que resultó en medidas de control sobre el consumo de éstos como en tan solo unas horas al día. En tal escenario surgió la necesidad de emplear la madera y el carbón de leña para abastecer de la energía que requerían los procesos industriales de la época (Manrique, 2008, p. 54).

En ese mismo siglo, la peste negra devastó a los países europeos y afectó, igualmente, a la economía de Inglaterra. Luego de la recesión de la pandemia, la demanda por calor de combustibles se mantuvo a niveles bajos durante un siglo más porque muchas de las actividades industriales permanecían a pequeña escala y porque la población proseguía a bajas tasas hasta la segunda mitad de la centuria del XV (Fouquet y Pearson, 1998).

Desde los inicios del siglo XVI la economía inglesa comenzó a recuperarse dramáticamente, así como la demanda por combustibles para la manufactura y

[7] El molino de viento es de origen chino, pero también se utilizaba comúnmente en el Mediterráneo y Oriente Medio, y en menor frecuencia en la India y en Asia Oriental (Smil, 2004, p. 553).
[8] Ver Fouquet y Pearson (1998).

para los hogares, empezó a crecer de manera rápida. Además, el consumo de energía estuvo estimulado por los bajos precios de los combustibles para calefacción.

Los precios de la madera y el carbón (este último proveniente de la primera), se encontraban en un menor nivel que los de otras fuentes de calor durante el siglo XVI, esto incitó a su consumo y a configurarse como recursos fundamentales en el entramado productivo (Fouquet y Pearson, 1998, p. 11). Cuando la población empezó a crecer en mayor proporción, así como la demanda de madera, se generó escasez de éste factor y de otras fuentes primarias de energía; de esta forma se fomenta el uso de otra base energética como el carbón mineral.

A partir de aquel momento, la era del poder animado y los combustibles de biomasa, estaba llegando gradualmente a su fin, lo cual va abriendo paso a la transición desde una sociedad y economía dependientes de fuentes orgánicas (economía orgánica avanzada), hacia una en función de energía inorgánica (economía de origen mineral), como se detallará en la siguiente sección.

1.2 Inicios de la economía de origen mineral (Revolución Industrial)

El conocimiento y técnicas aprendidas durante el período de la Revolución Agrícola fueron superados con nuevas máquinas y tecnologías más eficientes que permitían el uso de recursos naturales no renovables dando paso a la Revolución Industrial, la segunda gran revolución tecnológica de la humanidad, donde el motor del crecimiento económico fue la energía de fuentes inorgánicas. Holanda era el principal candidato para llevar a cabo tal proceso debido a su equilibrio en la industria y en el agro; sin embargo, no contaba con las suficientes minas de carbón, mientras que Inglaterra poseía grandes cantidades en reserva, que aunados a su actitud mental, escala de valores y una serie de reformas políticas y sociales

realizadas durante los siglos XVI y XVII, resultaron determinantes para este proceso de industrialización (Cipolla, 1979, p. 18).

Se debe precisar que la transición de la economía de origen orgánica hacia una de origen mineral o basada en combustibles fósiles, ocurrió antes de la fecha de la Revolución Industrial, -fecha que se le ha asignado-. Los cambios tecnológicos acontecidos durante el período de la Revolución Industrial[9] sólo hacen parte de una fase del largo proceso que se venía desarrollando en un período de más de dos siglos en Inglaterra en torno a la generación de nuevas tecnologías (Wrigley E. , 1993).

Un dato para tener en cuenta es que en el año 1600, la estructura económica y social de Inglaterra poco se diferenciaba de la del resto de países de Europa Occidental, mas en 1800 se distinguía una amplia brecha entre Inglaterra y las otras regiones del mundo. Este contexto es indicativo de dos aspectos de la economía inglesa que merecen particular atención: los grandes avances en la productividad agrícola y el notable desarrollo del crecimiento urbano. De un lado, la productividad de la agricultura en Inglaterra se dobló entre 1600 y 1800, mientras que en Francia los incrementos fueron mucho más modestos (en torno al 20 por ciento). Con respecto a la población urbana, ésta creció tan rápidamente que en 1800 comprendía 28% de la población total mientras en 1600 no representaba más de 8; en contraste, en Francia las cifras correspondían a nueve por ciento en 1600 y a 11% a inicios del siglo XVII (Wrigley E. , 1992).

Inglaterra fue el primer país en hacer la transición del uso de la madera al carbón durante los siglos XVI y XVII debido a que la madera[10] disponible era insuficiente para el abastecimiento de la población que estaba en continuo crecimiento, igual que el desarrollo industrial. La idea fue utilizar el carbón de cok

---

[9] Es importante mencionar que *la maquinaria de los inicios de la Revolución industrial era accionada por fuentes naturales de energía heredadas de la revolución de la energía en la Edad Media* (Cipolla, 1979, p. 211).

[10] La madera era un recurso esencial para proporcionar energía, para la construcción de embarcaciones y otras utilidades productivas y sociales, que ante el incremento de la demanda por este recurso y la escasez de existencias, se llega a una crisis de provisión energética (Manrique, 2008, pp. 58, 59).

(obtenido a partir del carbón mineral de modo parecido a como el mineral vegetal se saca de la leña), sin embargo, habían restricciones técnicas para su obtención, que luego fueron superadas mediante ensayo y error (Cipolla, 1979).

Inglaterra empezó a explotar los depósitos de carbón, generándole amplios beneficios en el sistema productivo, dado que superaba la escala de cualquier otro flujo energético procedente de fuentes orgánicas (Wrigley, 1993, p. 68). El auge comercial e industrial de la época promovió, en mayor medida, el consumo del carbón y estuvo acompañado por el desarrollo de tecnologías que permitían el uso intensivo de este mineral, lo que derivó en la Revolución Industrial (Manrique, 2008, p. 59).

Allí en donde yacían minas de carbón, ubicadas especialmente en el noreste de Inglaterra, y en donde el acceso y extracción del mineral se daba fácilmente, se obtenía el mineral a bajos costos, lo cual era una gran oportunidad para las industrias y para el acelerado crecimiento económico durante el s. XVIII. Las industrias y productores sacaron ventaja de la relativa estabilidad de precios reales del carbón y, en consecuencia, usaban más energía que otros factores de producción (Fouquet y Pearson, 1998, p. 13).

A lo largo de los siglos XVII y XVIII se estaba demandando en Inglaterra mayores volúmenes de carbón, algo sin precedentes en su historia y en la de otros países europeos o asiáticos. Muchos procesos industriales incrementaron el uso de este mineral, el cual se duplicó entre 1700 y 1750 y se triplicó entre el período 1750-1800 (Fouquet y Pearson, 1998, p. 13). Naturalmente, la producción británica de este combustible crecía a altas tasas, se estima que en 1700 estaba entre los 2,5 y 3 millones de toneladas[11] y hacia 1800 había alcanzado una cifra anual de 15 millones aproximadamente, en contraste con la producción del resto de Europa que no excedía los 3 millones de toneladas (Wrigley, 1993, p. 71).

El uso del carbón incrementó, así mismo, el producto y la renta, dando lugar a que un mayor número de personas demandaran más bienes y servicios. De tal

[11] Superaba hasta cinco veces a la producción de todo el resto del mundo (Wrigley, 1993, p. 71).

manera, el crecimiento de la economía estuvo impulsado principalmente por el empleo de este mineral que potenció la eficiencia de la producción, algo que los economistas de la época no sabían explicar y se lo atribuyeron a otros factores como la especialización del trabajo.

Otra de las utilidades del carbón es que reducía la competencia entre las necesidades primarias de alimentación, vestido, alojamiento y lumbre, debido a que este recurso proporcionaba calor para caldear la casa y cocinar, al mismo tiempo se podía utilizar la tierra para tener ovejas y cultivos de trigo y para proveerse de alimento y vestuario; además, permitía que la producción de ladrillos se obtuviera a costos reducidos gracias al calor provisto por el carbón, lo cual condujo a una reducción del uso de madera con fines arquitectónicos o para la vivienda (Wrigley, 1993, p. 69).

En suma, el carbón fue de enorme utilidad en diferentes sectores de la economía del Reino Unido, así como se detalla en la Tabla 1.1 entre el período 1700 y 1855.

Los sectores domésticos y manufactureros, fueron los primeros en aprovechar la energía contenida en el carbón y posteriormente cuando el hierro y el acero presentaron mayor dinamismo en los hogares y en otros procesos productivos, se fomentó la larga y lenta evolución de esta industria naciente, fue posible que hacia la segunda mitad del siglo XVII la producción de hierro se realizara en grandes fábricas. A pesar de tales avances para su elaboración, aún habían restricciones que luego de mejorías por algunos creativos, fue finalmente Cok quien realizó la fundición de este mineral con base en el carbón (Manrique, 2008).

Tabla 1.1 Consumo estimado del carbón en Reino Unido por sectores económicos (millones de toneladas)							
Sectores/año	**1700**	**1750**	**1800**	**1816**	**1830**	**1840**	**1855**
Doméstico	1.40	2.20	5.30	9.3	10.7	11.5	15.0
Industria del hierro y el acero	0	0	1.8	1.9	3.6	7.1	15.5
Manufactura en general	1.2	2.0	5.8	4.9	7.0	9.7	18
Minas de carbón	0	0.1	0.6	0.9	1.2	2.0	4.2
Producción de gas	0	0	0	0	0.5	1.0	2.7
Ferrocarriles	0	0	0	0	0	0.3	1.4
Barcos	0	0	0	0	0.2	0.6	1.6
Total	2.6	4.3	12.5	17	23.2	32.2	58.4

Fuente: Tomada de Fouquet y Pearson (1998, p. 14)

La industria del acero y el hierro tomó ventaja de la utilidad del carbón y empezó a usarlo especialmente a partir del siglo XVII. Asimismo, en la medida que esta nueva industria se potencializaba, la manufactura también lo hacía porque dependía tanto del hierro y el acero para su producción, indicando en últimas que el carbón fue la base para otros sectores productivos. Igualmente, el sector transporte con los ferrocarriles y los barcos, emplearon la fuerza contenida en el carbón especialmente a partir de 1855.

De esa manera, la sociedad inglesa estuvo ampliamente beneficiada por el uso del carbón como fuente energética, dado que era posible obtener la misma cantidad de calor para cocinar y caldear las casas y para la elaboración de diferentes procesos como la cocción de ladrillos, la fundición y el trabajo de los metales y una gran cantidad de procesos industriales que no se podían proveer con el uso de la madera. El carbón fue importante para el desarrollo de la economía y la sociedad de Inglaterra y en el fomento de la inversión para aumentar el trabajo mecánico y la eficiencia de las máquinas que permitía el aprovechamiento de este recurso. No resulta extraño que desde entonces esta nación haya sido una de las primeras sociedades energético-intensivas (Manrique, 2008, p. 61).

Así, el advenimiento a gran escala de maquinaria, el mejoramiento de diferentes técnicas industriales, las herramientas e innovaciones tecnológicas,

marcaron el fin de la historia Medieval y el inicio del modelo de producción capitalista (Cipolla, 1979, p. 222). Este modelo empezó a predominar en Inglaterra y era el paso hacia una nueva estructura de desarrollo, hacia transformaciones políticas, económicas y sociales. Además el encarecimiento progresivo del trabajo humano, posibilitó en alguna medida el desarrollo industrial europeo con respecto a las otras culturas del mundo, pues mientras Europa logra la aplicación de máquinas que amplifican el trabajo del hombre, en las civilizaciones asiáticas el ser humano siguió siendo la fuerza motriz más importante (Schultz, 2001, p. 62).

La actividad comercial e industrial de Inglaterra continuó con su tendencia creciente a un ritmo sin precedentes en la historia económica, pues la producción real de éstas, se cuadriplicó en lo corrido de la centuria del XVIII (Cipolla, 1979). Luego de la notable expansión de la producción durante los siglos XVI y XVII, Inglaterra tenía el indicador más alto del mundo en cuanto a riqueza material, esto a su vez condujo al incremento de la población pues era posible tener un mejor nivel de vida. El auge industrial permitió producir a menores costes y así mismo, vender bienes y servicios a menores precios, de tal forma la sociedad podía acceder a estos nuevos productos con mayor facilidad que antes. En cuanto al mercado laboral, su mutación fue para requerir personal especializado y educado, y si bien, por un lado, esto conllevó a beneficios, también trajo desventajas para algunos trabajadores como los tejedores manuales que prácticamente corrían el peligro de ser desplazados por maquinaria y les surgía la imperiosa necesidad de alcanzar otros niveles de conocimiento. La economía británica se estaba expandiendo y a su vez, la exportación de bienes y servicios que inicialmente era de bajas cantidades, pero luego experimentó un vertiginoso crecimiento captando mercados de otros países. Este nivel de exportaciones fue impulsado especialmente por la industria algodonera,[12] hecho contundente que reiteró a

[12] *La industria del algodón fue la primera gran industria importante de la naciente Revolución Industrial y como tal, su transformación y desarrollo tuvo en Inglaterra las más relevantes consecuencias sobre el sistema económico y social en su conjunto* (Manrique, 2008, p. 99). De hecho, esta industria alcanzó a ganar 40% del volumen de las exportaciones nacionales en 1815 (Cipolla, 1979, p. 231).

Inglaterra como una economía de mercado, contrario a lo que sucedía en las economías agrícolas del resto de Europa.

De otro lado, la extracción en las minas de carbón era una gran dificultad ya que se estaba llegando al límite que tenía la fuerza motriz para bombear el agua y mantener la mina seca. Este impedimento fue el que condujo a la creación de la primera máquina de vapor comercialmente viable de Newcomen hacia aproximadamente 1712, y aunque era muy útil en las minas, ésta no era tan eficiente y consumía bastante combustible (Cipolla, 1979, p. 211). Posteriormente, fue James Watt quien mejoró la máquina de vapor al crear un condensador separado del cilindro, invento que patentó en 1769 y la entregó al comercio en 1776; este arreglo permitió tener una máquina de enorme utilidad para bombear agua en las minas de carbón y también para el desarrollo de muchas otras tareas porque una de sus cualidades es que podía transportarse para generar potencia en cualquier lugar. De todas formas, la eficiencia de la conversión de esta máquina[13] todavía era reducida (menos de 5%) y su motor funcionaba en promedio a 20 kW,[14] más de cinco veces que los molinos de agua contemporáneos, cerca de tres veces más que los molinos de viento y 25 veces más que el rendimiento de un buen caballo (Smil, 2004, pp. 555, 556).

La máquina de vapor marcaría el inicio de la Revolución Industrial, éste fue el primer diseño capaz de convertir la energía química de los combustibles en energía mecánica y fue muy útil durante las tres décadas siguientes en casi todas las industrias (Smil, 2006, p. 92). Gracias a esta innovación, la producción final por trabajador y por unidad de capital invertido aumentó significativamente, al igual que el nivel de producción agregada (Manrique, 2008, pp. 72, 74). En este sentido, el trabajo humano y animal se redujo mientras la escala de producción se elevaba.

[13] La eficiencia de la máquina de vapor se incrementó significativamente (10 veces más) después de 100 años del surgimiento de la máquina de Watt, con una tasa de rendimiento equivalente a 1 Mw (Smil, 2004, p. 555).
[14] Unidad de medida de potencia equivalente a 1000 vatios (W).

A la industria del hierro, la máquina de vapor notablemente le favoreció porque era usada para operar el fuelle de alto horno. Lo mismo sucedió en el sector transporte en donde la aplicación de la energía de vapor a la tracción, fue el enclave perfecto para su mejoramiento, específicamente con la creación del ferrocarril en Inglaterra. En el barco, la máquina de vapor tuvo éxito pero mucho tiempo después.

El ferrocarril incrementó la demanda de carbón, hierro y acero, lo que condujo a la expansión de estas industrias. Antes de 1830 Inglaterra no tenía porcentajes tan altos de inversión, esto fue gracias a la construcción del ferrocarril que impulsó las demandas de capital y permitió que entre el período 1835 a 1870, la inversión de capital aumentara en proporciones mayores, caracterizándose como un Moderno Estado Industrial (Cipolla, 1979). De esta forma, el desarrollo del ferrocarril y la máquina de vapor resultaron consustanciales para el afianzamiento de la Revolución Industrial en Inglaterra.

El impecable avance y desarrollo en el ferrocarril no sucedió con el barco de vapor que era menos necesario en el interior de Gran Bretaña. En contraste, la navegación a vapor en Estados Unidos se estaba fortaleciendo en sus ríos hacia 1815, mientras que en Gran Bretaña se utilizaron los buques a vapor sólo a partir de 1818 (Cipolla, 1979).

Entonces, la abundancia de carbón en Inglaterra y su capacidad para convertirlo en energía mecánica, contribuyó al desarrollo de edificaciones y la construcción de puertos, carreteras, vías fluviales, lo cual facilitó el transporte y la comercialización de bienes, permitió la transformación social y económica y la expansión urbana del país.

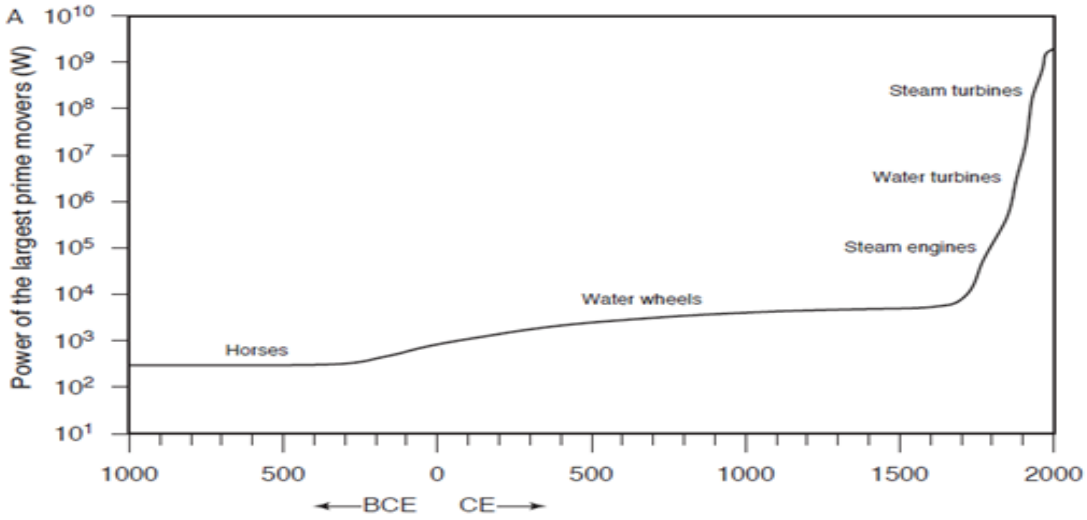
De lo anterior se distingue que toda vez que el hombre tenía mayor conocimiento sobre la naturaleza, también desarrollaba innovaciones o motores que le permitieron convertir los recursos en energía útil para las actividades económicas y, en general, de la sociedad. La Figura 1.1 ilustra los motores que posibilitaron tal proceso como fueron las turbinas y ruedas de agua, las máquinas y las turbinas de vapor; a medida que transcurría el tiempo, la capacidad para hacer

trabajo de cada una de éstas innovaciones aumentaba gracias al ingenio del ser humano.

Además debe decirse que los motores creados durante la Revolución Industrial, no fueron producto de científicos, estos fueron promovidos por artesanos, técnicos, obreros y comerciantes, quienes en el ejercicio de sus oficios, les surgió la imperiosa necesidad de construir y avanzar en otros aparatos más eficientes y útiles en su producción. Aunque Schultz (2001) contrasta lo anterior porque determina que algunos inventos y máquinas, realizadas durante el proceso de industrialización, fueron producto de la unión entre la técnica y las ciencias naturales como por ejemplo la máquina de vapor, esto es una muestra de que él no lo concibe como un aparato resultado de las necesidades en el ejercicio laboral. Para Schultz (2001), la invención de la máquina de vapor significó el fin de la separación entre ciencia y técnica y marcó, a la vez, el final de la Edad Moderna.

Figura 1.1 Potencia de los principales motores

(1000 a.C y 2000 d.C)



Fuente: Smil (2004, p. 552)

La figura hace evidente que la máquina de vapor tenía gran potencia (medida en vatios) y capacidad de hacer trabajo con respecto a los instrumentos extrasomáticos usados antes de su creación. Se debe precisar que la escala de la figura es logarítmica y, por esa razón, no es posible distinguir exactamente entre la potencia de la rueda de agua y la de los caballos, pero es notable que esta primera

herramienta mejoró significativamente la capacidad de fuerza con respecto a la tracción animal. Muchos años después, fue la máquina de vapor la que marcó claramente la diferencia en la generación de potencia en relación a otras máquinas, de allí en adelante, estos instrumentos fueron bastante útiles en un gran número de procesos industriales gracias a su capacidad para hacer trabajo mecánico.

Así como la máquina de vapor produjo mayor potencia, también requería de más consumo de carbón. Esto fue inminente a finales del siglo XVIII y durante todo el siglo XIX, no sólo en Gran Bretaña sino también en los países que se convirtieron en industrializados que con el uso de maquinaria necesitaban elevadas cantidades de energía para su funcionamiento. Lo anterior se muestra con las cifras de producción de carbón que para 1800 era de 11,5 millones de toneladas y en 1899 fue de 485 (Daemen, 2004, p. 466); por ser el carbón la fuente de energía más importante en Gran Bretaña, en Estados Unidos y en los países en proceso de industrialización durante el siglo XIX, fue que se le denominó el siglo del reinado del carbón.

Por todo lo anterior, hay dos características esenciales de este período que merecen considerarse. De un lado, la energía contenida en los combustibles fósiles junto con las innovaciones técnicas, marcaron la transformación industrial y económica. De otro lado, el progreso tecnológico y el desarrollo de los nuevos motores vistos anteriormente tienen en común un aspecto típico de este tiempo: la mayoría surgieron del intento de hallar maquinaria y artefactos que fueran más eficientes para aumentar la producción de bienes y servicios y así suplir las necesidades de demanda de una economía en expansión.

De esta forma, el carbón desempeñó un papel consustancial como recurso energético en el proceso industrial, en el desarrollo de la sociedad y en la economía de Inglaterra, donde la máquina de vapor y el ferrocarril fueron tecnologías primordiales debido a que mejoraron el uso eficiente de este mineral. Gracias al aumento del aporte energético contenido en el carbón, la economía inglesa entró en una fase de mayor productividad y el trabajo físico se incrementó, lo cual se

tradujo en nuevas formas de organización industrial y en un aumento del bienestar de Inglaterra y de Estados Unidos luego de 1769.

Por consiguiente, se puede sintetizar que el cambio de mayor relevancia en la economía de origen mineral, fue liberar a la producción de la dependencia de la productividad de la tierra y de las materias primas orgánicas que existían en algunas industrias desde hacía mucho tiempo (Wrigley E. , 1993). Asimismo, es de destacar que la aplicación de la energía mecánica y calorífica en la industria, permitió elevar la productividad e igualmente, el producto agregado, mientras que los costes de producción se redujeron.

1.3 La era de la electricidad y el petróleo

No sólo la nación británica fue la beneficiada con el uso del carbón y las máquinas que transformaban su energía en trabajo equivalente, en este proceso se involucró Estados Unidos a finales del siglo XIX ya que venía experimentando una rápida acumulación de conocimiento, de maduración técnica, tecnológica e industrial y de un permanente flujo de inversiones que lo potenciaron como la economía mundial predominante así como también en un gran consumidor de recursos naturales.

Si bien Inglaterra prevalecía en la obtención de carbón a nivel mundial durante el siglo XIX, Estados Unidos presentaba una tendencia creciente en la producción de éste y a finales de la centuria, superó al líder global y se convirtió en el más grande productor de carbón, manteniendo su posición hasta la clausura del siglo XX. Así, el escenario de la historia sobre las fuentes disponibles de energía se analizará principalmente en el contexto de Estados Unidos, gracias a su liderazgo en la producción de petróleo y en una fuente de energía secundaria, la electricidad.

El carbón perduró durante el siglo XIX como la principal fuente de energía y fue especialmente aprovechado en los países industriales. Su tiempo de

dominancia llegó a la cumbre en la centuria del XX como se verá más adelante, a través de un proceso de sustitución paulatino en el que recursos como el gas y luego el petróleo, entraron en la senda energética pero no de forma cabal para reemplazar al mineral.

De forma parcial se pasa del carbón al uso del gas de hulla que fue introducido a inicios del siglo XIX, éste se convirtió en la mayor fuente de luz tanto en las pequeñas como en las grandes ciudades hacia mediados de la misma centuria; en 1802 se conoció lo que podría denominarse como la primera cocina de gas y, posteriormente, se diseñaron los primeros hornillos y calentadores.[15] El gas como fuente energética, empezó a tener auge dado que la cantidad de gas vendida se triplicó entre 1880 y 1912, y pese a que continuó creciendo hasta 1938, su producción cesó al entrar en competencia con la electricidad cuya oferta creció enormemente y proporcionó una nueva forma de generar potencia, calor y luz en muchos centros urbanos (Periman, 2004, p. 853).

El carbón fue perdiendo participación en la canasta energética mundial mientras que se desarrollaba otra forma de energía procesada como fue la electricidad, su apogeo en la industria y la economía fue todavía mayor que la del carbón. Aquí se deja, entonces, el uso del carbón para pasar a la repercusión de la senda energética compuesta por la electricidad y el petróleo en el escenario principal que fue Estados Unidos como se muestra a continuación, iniciando con una descripción sobre la energía eléctrica y luego con el hidrocarburo[16].

1.3.1 La energía eléctrica en Estados Unidos

Las mayores transformaciones en las formas y usos de energía en Estados Unidos, ocurrieron entre 1880 y 1930. En este período, el empleo de energía directa

[15] Ver Schoijet (2002, p. 53) y Daemen (2004, p. 465).
[16] Esto no implica que el auge de la electricidad o el petróleo tenga un orden, de hecho, su producción y consumo masivo se da en una época paralela.

estaba soportado por recursos naturales como el carbón y el agua, pero se torna hacia una forma de energía secundaria: la electricidad. Esta fuente de energía secundaria fue utilizada con mayor eficiencia productiva que el carbón y el agua, de tal modo que producía mayores bienes y servicios por unidad de capital, trabajo, energía y materiales empleados. La electricidad fue usada en la industria en 1883, un año después de la comercialización de la electricidad de corriente directa de Edison; pero su aplicación era limitada porque antes de 1885 ésta tenía una capacidad de menos de una unidad de caballo de fuerza (horsepower, hp)[17] (Devine, 1983).

Debido a las necesidades crecientes de la industria por mayor energía, surgió la luz eléctrica a finales del siglo XIX, específicamente en 1882 cuando entró en operación la primera central de generación eléctrica hecha por Thomas Edison que estaba localizada en Nueva York y estaba soportado por un sistema de corriente directa (DC) (Periman, 2004, p. 857).

A partir de la creación del nuevo sistema de producción y transmisión de la electricidad, siguieron otras contribuciones e innovaciones como las de Nikola Tesla quien descubrió y estableció las bases de los sistemas modernos de potencia eléctrica por Corriente Alterna (AC) y George Westinghouse la distribuyó y comercializó; también contribuyó Charles Parsons quien patentó la primera turbina de vapor en 1884, William Stanley quien introdujo un transformador eficiente en 1885 y el motor eléctrico elaborado por Tesla en 1888 (Smil, 2004, p. 556). Este motor, desarrollado por Tesla y mejorado por grandes empresas de electricidad, marcó el inicio de la aplicación intensa de energía eléctrica para todas las actividades productivas y desplazó rápidamente a las máquinas de vapor y a un importante volumen de mano de obra (Manrique, 2008).

De la corriente alterna debe destacarse que mejoró el sistema de distribución de energía a gran escala en relación a la corriente continua desarrollada por Edison. Es sabido que entre Tesla y Edison se desató una disputa para definir el

[17] Es una unidad de potencia que fue inventada por James Watt en 1782 y significa la potencia necesaria para elevar verticalmente a la velocidad de 1 pie por minuto un peso de 33.000 libras.

mejor sistema de corriente, sin embargo la corriente alterna demostró ser más eficiente gracias a un transformador que permitió elevar la tensión de una forma más exacta y facilitó la transmisión a larga distancia.

En 1890 George Westinghouse desarrolló en las cataratas del Niágara la primera instalación hidroeléctrica, a gran escala, con una capacidad de 200,000 hp y posibilitó la transmisión de electricidad a grandes distancias. De esta forma, la electricidad empezó una nueva era que sustituyó al vapor para mover la maquinaria y reemplazó la lámpara de gas por la lámpara incandescente inventada por Thomas Edison (Schoijet, 2002).

A merced de las anteriores contribuciones, el sistema eléctrico mejoró sustancialmente, y hacia 1890 resultó en un sistema con excelente funcionamiento que transformó positivamente cada actividad diaria de la sociedad, iluminó desde los interiores de los hogares hasta las calles, actuó como fuente de energía para los trenes urbanos e interurbanos y, además, tuvo un gran impacto en la producción industrial dado que permitió adquirir mayor producción por unidad de capital y de trabajo.

- **La energía eléctrica y su relación con la sociedad y el desarrollo industrial**

Fue la manufactura americana la pionera en realizar la transición de las máquinas de vapor hacia los motores eléctricos, los cuales facilitaron los procesos industriales, que luego de 45 años de su primer uso, en 1929 representaban 78 por ciento[18] de la capacidad total instalada para impulsar la maquinaria. La electricidad fue una fuente energética fundamental porque permitió la transmisión de potencia mecánica a las fábricas y redujo el consumo de energía gracias a su eficiencia.

[18] Ver Devine (1983, p. 349).

Estos grandes avances de la tecnología impulsaron la mayor producción y constituyeron el inicio de la segunda fase de la Revolución Industrial, consolidando el sistema capitalista en función de las innovaciones tecnológicas y la calidad de vida de las denominadas sociedades industriales (Manrique, 2008, p. 131). Un ejemplo de esta transformación se observa con el gigante industrial Henry Ford, precursor de un ensamblaje altamente productivo, derivada de la energía eléctrica.

Los primeros experimentos de transmitir imágenes a distancia se efectuaron mediante la electricidad y sistemas mecánicos. Las primeras emisiones públicas de televisión las realizó la BBC en Inglaterra en 1927 y la CBS y NBC en Estados Unidos en 1930. Fue sólo después de la segunda guerra mundial que la electricidad potenció la nueva era de los computadores (Smil, 2004).

La electricidad facilitó las labores cotidianas de los hogares que realizaban las mujeres porque una gran variedad de máquinas e innovaciones ayudaban en el qué hacer de tareas. Así como posibilitó la expansión de los aires acondicionados que fue patentado por William Carrier en 1902, esta innovación era importante principalmente en los países tropicales y subtropicales (Smill, 2004, p. 556).

Para sintetizar, es necesario mostrar la relación entre Producto Nacional Bruto y el consumo de energía de Estados Unidos entre 1890 y 1980. Las cifras detalladas en la Tabla 1.2 aportan dos elementos clave para considerar. De una parte, el consumo de energía se multiplicó 14,86 veces entre 1890 y 1970, igualmente, el PIB se incrementó aproximadamente 14 veces en dicho período (Manrique, 2008, p. 153). De otra parte, estos datos históricos son un indicativo del estrecho vínculo que existe entre el crecimiento económico y el gasto energético. En la medida que el consumo de energía aumentaba a gran escala, también lo hacía la producción de Estados Unidos.

Tabla 1.2 Producto Nacional Bruto (PNB) y consumo de energía en Estados Unidos (1890-1980)			
Año	**PNB (Bill. US$ 1972)**	**consumo energía (cuatrillones-BTU)**	**Energía/PNB (miles BTU/US$)**
1890	79	4,497	56,3
1895	94	5,355	56,4
1900	116	7,572	65,0
1905	145	11,369	77,9
1910	186	14,800	79,5
1915	193	16,076	83,0
1920	214	19,788	92,3
1925	276	20,878	75,6
1930	285	22,253	77,9
1935	260	19,059	73,3
1940	344	23,877	69,3
1945	560	31,439	56,1
1950	535	33,972	63,5
1955	657	39,729	60,4
1960	737	44,080	59,7
1965	929	52,990	57,0
1970	1.085	66,830	61,5
1975	1.234	70,707	57,3
1980	1.480	76,201	51,4

Fuente: Devine (1983, p. 348)

Es meritorio señalar que la intensidad de energía medida como la razón energía-PNB, estuvo en continuo aumento hasta la primera Guerra Mundial, pero de 1920 en adelante este indicador cayó. Esto se explica porque el consumo de energía se redujo gracias a la generación eficiente de electricidad, gas natural y combustibles de combustión interna que eran más productivos que la potencia del carbón y el agua, posibilitando la producción de mayores bienes y servicios por unidad de capital, trabajo, energía e insumos empleados.

En este contexto se debe anotar que si bien la energía fue parte primordial para la producción, también lo fueron los otros factores productivos, capital y trabajo, así como el progreso tecnológico que ha permitido disminuir la presión

sobre el uso de los recursos al aumentar la eficiencia productiva y reducir la intensidad energética.

Para cerrar, vale la pena resaltar que la creciente expansión y perfeccionamiento del sistema eléctrico en Estados Unidos tuvo un desarrollo exitoso en términos productivos y sociales. Esta forma de energía secundaria referencia una mutación tecnológica y productiva para el país norteamericano que se configuró como la potencia económica y tecnológica a nivel mundial. Estos avances técnicos y formas de generación energética también se propagaron posteriormente, a otro número de países como Japón u otros del continente asiático y con el paso del tiempo, a la mayor parte del territorio mundial.

Observando otro panorama energético en Estados Unidos, debe mencionarse al petróleo como una fuente primaria de energía, del cual también se deriva electricidad y constituye un elemento simbólico para el desarrollo de la economía y la sociedad de los siglos XX y XXI, como se verá a continuación.

1.3.2 La era del petróleo

El petróleo surgió a partir del resto de plantas y microorganismos enterrados por millones de años que a través de procesos físicos y químicos, conformaban yacimientos petrolíferos. El oro negro se remonta a tiempos desde la prehistoria ya que incluso la biblia lo describe como betún o como asfalto (Sedillot, 1977). Además, el registro histórico expone que este fue útil como ungüento y como impermeabilizante para las embarcaciones durante la época precolombiana en América. Desde tiempo atrás, el asfalto mixto con aceite mineral fue usado en las aceras y carreteras, en los barcos y como medicina.

La historia y usos de este recurso se remonta a miles de años atrás, más el período de auge en la producción de petróleo tomó lugar en el siglo XX. Bien es sabido que desde los primeros años del siglo XIX, éste era importante como medio de iluminación. Pese a que la llama de las lámparas del crudo era vacilante, se

reconoce su contribución para alumbrar las calles e interiores de los hogares que tanto la requerían. De cualquier manera, con la aparición de nuevas fuentes de luz con el gas de alumbrado y el uso de la electricidad, se buscaron y se hallaron nuevas y significativas aplicaciones al crudo.

La aparición del motor de combustión interna[19] fue una innovación importante para el desarrollo del sector transporte. Desde siglos atrás los ingeniosos deseaban reemplazar la tracción humana y animal por un vehículo que se desplazara solo, fue gracias a las invenciones y al uso del petróleo que el transporte terrestre evolucionó. Se dice comúnmente que los primeros autos de combustión interna fueron desarrollados por Karl Benz quien en 1885 construyó su primer modelo, luego fueron Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, quienes elaboraron su propio automóvil en 1889. Las primeras compañías creadas para elaborar vehículos fueron las francesas Panhard (1889) y Peugeot (1891), mientras que Henry Ford inició en 1908 la fábrica de automóviles y hacia 1922, masificó la industria del automóvil con el objetivo de transformar el transporte; Ford implementó un sistema innovador basado en producción en cadena. Puede decirse que Ford corroboró lo planteado por el economista clásico, Adam Smith, en el que la especialización es un camino fundamental para elevar la productividad, hecho evidente en la industria del automóvil puesto que el tiempo y costos de producción se redujeron considerablemente. Esto revolucionó la historia del automóvil y la economía de Estados Unidos, la proliferación de la producción de vehículos se inició en 1922 cuando Ford lanzó el modelo Ford T, en el mismo año ya había 18 millones de automóviles y para 1938 el número ascendió a 40 millones. Las cifras de producción de automóviles se elevaron aceleradamente así como el consumo de petróleo crudo que era necesario para derivar la gasolina.

Merced de Ford, el auto pasó de ser un objeto de lujo a uno de gran utilidad con mayor disponibilidad para el público, puesto que los costos de producción se

[19] El motor de combustión interna como se conoce hoy, fue elaborado por el alemán Nikolaus Otto. Él patentó en 1886 el diseño de un motor de combustión interna a cuatro tiempos, basado en los estudios del inventor francés Alphonse Beau de Rochas de 1862; es de anotar que Alphonse también se basó en el modelo de combustión interna de Barsanti y Matteucci.

redujeron y, a su vez, su precio de venta. Desde entonces, el carro se comerció y el petróleo fue el combustible fundamental en esta innovación. La industria del automóvil prosperó gracias a este recurso energético barato, induciendo a la par a que Estados Unidos se consolidara como el mayor productor, exportador y consumidor del petróleo, así que afianzó los cimientos para posicionarse como la gran potencia de la centuria del XX.

De igual envergadura fue la invención del avión, merced del petróleo y de los hermanos Wright[20] y Santos Dumont, quienes enfrentaron la ley de la gravedad y se elevaron en el aire con la ayuda de un motor de explosión. El primer avión comercial empezó en los inicios de 1920 y justo dos décadas después, el lujoso *Panm´s Clipperk* fue puesto en escena para atravesar el Pacífico desde San Francisco a Hong Kong (Smil, 2006, p. 106). En efecto, el oro negro se convirtió en una materia prima estratégica para la industria y el transporte en el siglo XX, el cual sería llamada la centuria de los motores del petróleo y ya no de las lámparas (Sedillot, 1977).

La historia del petróleo desde el siglo XIX ha estado marcada por riqueza, desde sus primeros descubrimientos y desde el inicio de la producción, refinación, transporte y distribución del mismo, los impulsores de cada una de estas actividades han visto crecer su capital a gran escala, los magnates de la industria energética, comprendieron el valor de la energía contenida en el petróleo y su capacidad para transformar la economía y la sociedad. La nafta ha forjado en la creación de mejores técnicas de producción, ha impulsado la evolución y mejoramiento del transporte, reduciendo costos y trasladando este fluido hasta cualquier parte del mundo. Sin embargo, según Sedillot (1977) también se ha visto desde el siglo XIX, rivalidad y competencia por la producción de este preciado líquido.

[20] Hacia 1904, los hermanos Wright construyeron su propio motor de cuatro cilindros con un cuerpo de aluminio y un cigüeñal de acero; los aviones propulsados por motores alternativos dominaron durante 50 años los vuelos comerciales y militares (Smil, 2004, p. 556).

Aquí cabe mencionar al empresario John Davison Rockefeller, quien entró en el negocio poco después del uso exitoso de una plataforma de perforación en Pensilvania, Estados Unidos. Él estudió esta industria y durante 30 años trabajó en un esquema de integración vertical para la generación, distribución y comercialización. En 1870 fundó la *Standard Oil Company of Ohio* y constituyó todo un monopolio alrededor del petróleo.

En este contexto, cabe evidenciar esta dinámica petrolera a inicios del siglo XX. A mediados de la centuria XIX la producción del crudo estaba cercana a cero, en 1860 se estima en 67 mil toneladas a nivel mundial y prontamente la cantidad se calculaba en centenares de miles de toneladas. Posteriormente la cifra era de millones de toneladas: 3,9 en 1880, 10 en 1890 y 21 en 1900. La producción en 1910 se eleva a 44 millones de toneladas y a 51 en 1913. De estas cifras globales, Estados Unidos participaba con 80% en 1880, que luego decayó a 40 por ciento en 1900 y, en 1913, vuelve a recuperarse con una proporción estimada de 66% del total (Sedillot, 1977, p. 102).

Luego de que la industria del carbón llevaba más de 800 años en actividad constante, en 1913[21] llegó al pico de su producción. Un derivado del crudo, aunado posteriormente a la aparición del motor diésel, apaciguaron el consumo de carbón y la armada británica comenzó a interesarse en mayor medida por el crudo, para usarse en todos su barcos. A partir de entonces, el petróleo[22] empezó a situarse como un recurso energético importante, sin decir que eliminó al carbón pues hasta la segunda mitad del siglo XX este último se mantuvo como la principal fuente de energía primaria del mundo, tal y como se refleja en la Figura 1.2 que detalla básicamente la composición de la energía primaria de Estados Unidos entre 1850 y 2010.

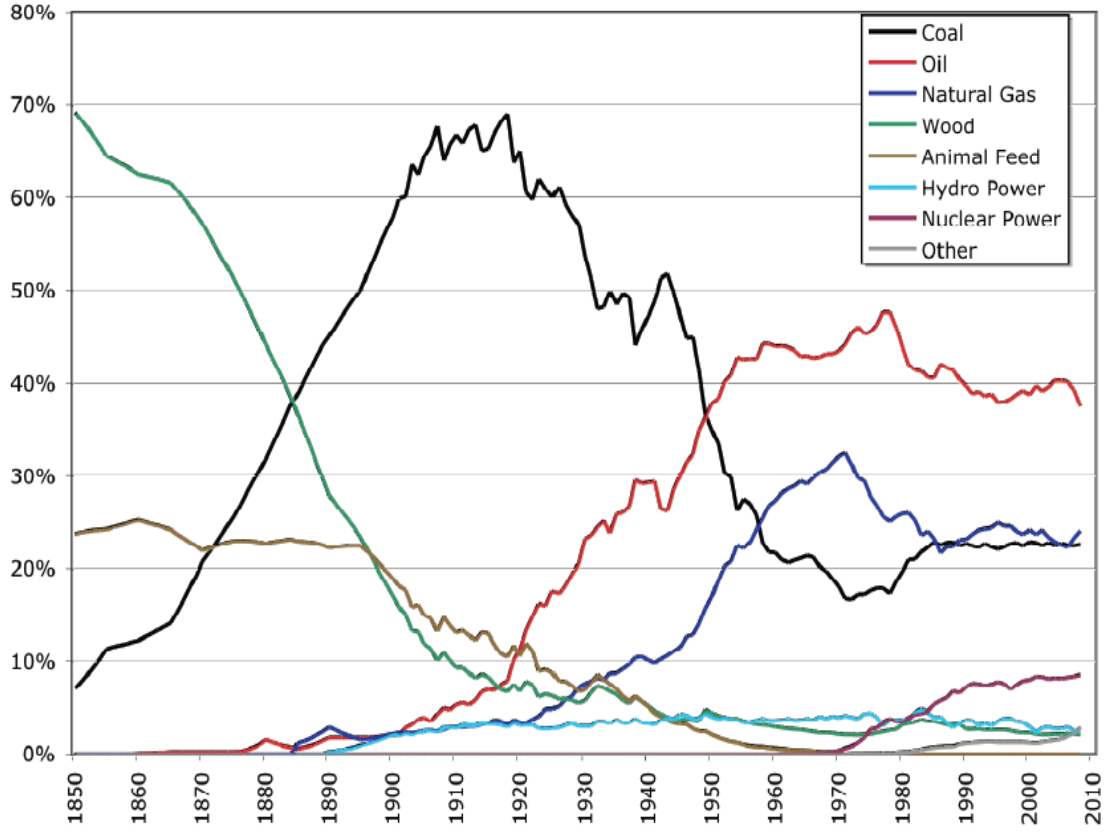
Desde 1850 la producción de carbón muestra una tendencia exponencial que en 1913 llegó a su punto máximo. De allí se observa cómo a inicios del siglo XX, el

[21] Tomado de Fouquet y Pearson (1998, p. 19)
[22] Podría decirse que éste fue el inicio del modelo energético industrial avanzado, al cual Cunningham asocia con el uso del petróleo (2003, p. 58).

petróleo empezó a ganar participación en la composición de la energía primaria en Estados Unidos y hacia 1950 superó al carbón.

En la primera Guerra Mundial (1914-1918) el petróleo aún no había sustituido totalmente al carbón porque seguía siendo bastante útil. En 1914, el oro negro fue utilizado por primera vez para los aviones y tanques primitivos. La guerra empezó con barcos de potencia de carbón, ferrocarriles y caballos, y al finalizar estaba soportada en un mayor uso del petróleo (Hall y Klitgaard, 2012, p. 15).

Figura 1.2 Composición de la energía primaria de Estados Unidos (1850-2010)



Fuente: Stern (2010, p. 12)

Entre 1910 y 1920, especialmente en el período posterior a la primera Guerra Mundial, la manufactura de Estados Unidos presentó importantes cambios gracias a la unidad de transmisión eléctrica que se convirtió en el método más común para dirigir la maquinaria y era más eficiente que otros métodos, con este era posible obtener mayor producción por menores unidades de energía (Devine, 1983).

En la segunda Guerra Mundial el petróleo tuvo mayor influencia como recurso energético, tanto para los aviones como para los vehículos, de cualquier manera el carbón continuaba predominando como fuente de energía primaria (Sedillot, 1977). Este fue el primer conflicto bélico sustentado en buena parte por el petróleo, un recurso con ventajas ligadas a su alta concentración energética por unidad de volumen, a la facilidad para transportarlo y la variedad de usos que tiene. Del petróleo se derivan servicios de calefacción y constituye la materia prima para la manufactura de más de 3.000 productos de uso cotidiano entre los que se encuentran los plásticos y las medicinas.

En el período de posguerra la manufactura mostró una reducción relativa que condujo, a su vez, a la disminución de la demanda por combustibles, particularmente por carbón y coque, mientras que el consumo del oro negro se triplicó desde 1960 hasta 1973 debido a la industrialización acelerada del mundo (Fouquet y Pearson, 1998, p. 23). Esta fue una época de grandes cambios económicos, sociales y políticos en el que, además, germina la era del petróleo y la electricidad, en tanto que los ferrocarriles pasaron de vapor a diesel y el calor de los hogares y los edificios pasó a los combustibles de petróleo y gas natural. Entre 1950 y 1960 fueron los años dorados para la economía americana, que luego de los períodos de depresión y de luchar en la segunda Guerra Mundial, esta nación se reafirmó como una gran potencia mundial (Hall y Klitgaard, 2012).

En 1960 surgió una nueva etapa del petróleo con la creación de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP)[23] que se constituyó como un cartel controlado por las principales naciones productoras del tercer

[23] Organización de Países Exportadores de Petróleo fundada por Venezuela, Arabia Saudita, Kuwait, Irán e Irak.

mundo, destronando la supremacía que ejercía Estados Unidos en cuanto a los precios del hidrocarburo. La producción del combustible en Estados Unidos llegó a su punto máximo en 1970, convirtiéndose en objeto de choques de oferta del mismo (Hall y Klitgaard, 2012, p. 22). El poderío de la OPEP fue notorio cuando decide recortar la producción del crudo en 1973, lo que puso al mundo ante la denominada "crisis del petróleo" con sus preeminentes consecuencias como el alza de sus precios[24] que se cuadruplicaron en un período muy corto, efecto que se transmitió a la economía real causando recesión. La tasa de crecimiento de la economía se suavizó precipitadamente y la tasa de ingreso real per cápita en los países plenamente industrializados, cayó a la mitad durante este *shock* petrolero (McPherson, 1994).

De esta crisis se resalta que, a partir de entonces, se reconsideró el patrón de consumo de los combustibles en las industrias, en tanto que los principales países manufactureros tomaron medidas que les posibilitó contraer en más de 25% el uso del crudo por unidad de producción desde 1973 (McPherson, 1994, p. 186).

Este rotundo acontecimiento mostró el poder de la energía en la economía, desde aquel momento, dichos temas empezaron a ser objeto de interés en el debate académico y político. En la década de los setenta la crisis del petróleo marcó la preocupación por el uso eficiente y racional de estos recursos para evitar su futuro agotamiento, ante lo cual surgieron planteamientos como el de la denominada economía ambiental, cuyos fundamentos teóricos se precisarán en el siguiente capítulo. En síntesis, la denominada "crisis energética" evidenció la trascendencia del petróleo y los recursos energéticos en la actividad económica y el alcance que podría tener su escasez en el mundo.

Si bien muchas instituciones educativas y de investigación a nivel internacional siguen trabajando en estos temas, el problema es estructural y está arraigado en la concepción del sistema económico que debe reconsiderarse como uno dinámico y basado en los límites biofísicos del planeta tierra, pues sí se continúa

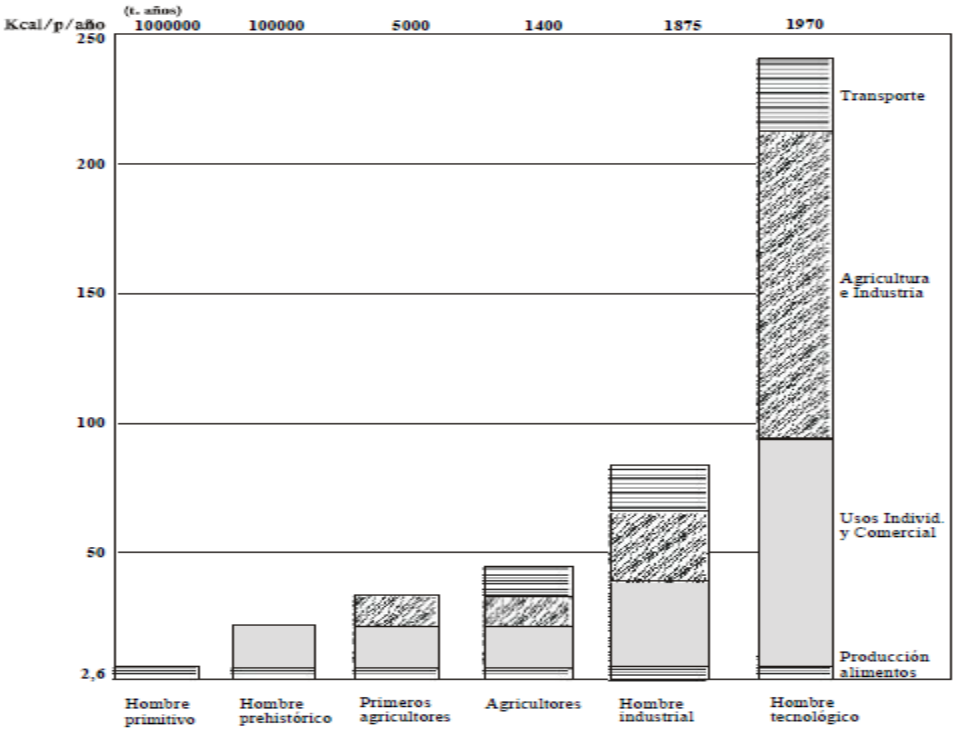
[24] A mediados de 1973 el costo de un barril de petróleo era de $2,90 dólares e iniciando 1974 era de $11,50 (McPherson, 1994, p. 184).

consumiendo recursos naturales a las tasas actuales, se estima que el carbón se agotará en los próximos 250 años, el petróleo en sesenta y el gas natural en 80 (Kostic, 2007, p. 8).

1.3.3 Análisis del consumo energético del hombre desde la prehistoria

Para cerrar este recorrido histórico sobre la evolución del hombre, la economía y su vínculo con la energía, se puede sintetizar todo lo anteriormente visto en la Figura 1.3.

Figura 1.3 Consumo energético diario per cápita en el tiempo



Fuente: Passet (1996)[25]

[25] Tomado de Manrique (2008, p. 251).

En la primera fase de la humanidad, el *homo sapiens* sólo disponía del alimento para su consumo energético. En tiempos de la Revolución Agrícola si bien el hombre había superado el gasto energético en relación a cientos de años atrás, este aún no era suficiente para proveer la energía que requería la sociedad. Tales condiciones fueron superadas a través de un largo proceso en el cual el hombre había adquirido conocimientos y en la medida del tiempo su ingenio le posibilitaba obtener mayor dominio sobre la naturaleza y asimismo aprovecharla. Posteriormente, la primera fase de la Revolución Industrial permitió sobrepasar los límites e incrementar de manera considerable su gasto en kilocalorías. Entre la Revolución Agrícola e Industrial se registra un salto importante en consumo energético.

El cambio más significativo entre el período total observado sucede entre el hombre industrial y el hombre tecnológico que data entre los años 1870 y 1970. En este lapso de tiempo, el gasto de kilocalorías del hombre tecnológico aumentó aproximadamente tres veces más en relación al industrial. De esto se identifica que la sociedad actual es energético-intensiva y que el hombre en menos de dos siglos multiplicó enormemente su consumo de energía, acontecimiento que no se había registrado en la historia de la humanidad y que merece particular atención en términos académicos y en representaciones teóricas coherentes en la disciplina económica.

La cuestión ahora es cómo será el panorama futuro de la energía, considerando los umbrales ecológicos para proveer de recursos y para servir como vertedero de desechos. Por esta razón, es importante dar una mirada hacia el vector energético actual y la prospectiva futura.

1.4 Panorama actual y futuro sobre la producción y consumo de energía

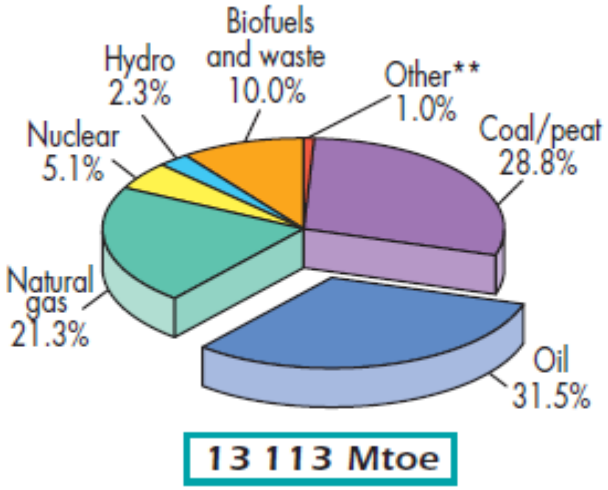
A raíz de la crispación petrolera ocurrida en los setenta del siglo XX, la humanidad se vio abocada por buscar alternativas energéticas. La respuesta coaccionada estaba dirigida hacia la implementación y uso de fuentes de energía más eficientes y menos contaminantes, y a pesar que se adoptaron alternativas especialmente para el sector transporte, actualmente los derivados del petróleo siguen siendo el soporte para los combustibles básicos. Esto implica que efectivamente no se puso en marcha una estrategia de largo alcance, ya que estos vectores energéticos no se han producido a gran escala. La expectativa, por supuesto, es que se potencialice la utilización de recursos renovables y que surja una nueva transición energética hacia una más limpia y sostenible.

- **Panorama actual sobre producción y consumo mundial de energía**

Mientras se espera fomentar el uso de energías alternativas, el panorama actual según *International Energy Agency* (IEA)[26] muestra que el petróleo, el carbón y el gas natural componen 80% de la tríada energética de mayor producción (Figura 1.4).

[26] Estas son cifras para 2011, para 2012 y 2013 se espera que no haya cambiado mucho. A la fecha la AIE no ha brindado un reporte estadístico sobre éstos dos últimos años.

Figura 1.4 Oferta de energía primaria mundial en 2011



Fuente: *International Energy Agency* (2013, p. 6)

El petróleo, el carbón y el gas natural constituyen 32,4, 27,3 y 21,4% respectivamente de la producción de energía primaria total. Los biocombustibles y residuos representan 10 por ciento, la energía nuclear 5,3% y los vectores hídricos 2,3. Las otras fuentes energéticas hacen referencia a energías renovables como la geotérmica, la solar, la eólica, entre otros, y tienen una menor participación.

Pasando al plano de la energía secundaria, particularmente de la electricidad, ésta es generada a nivel mundial a partir de fuentes primarias particularmente del carbón (41,3%), seguido del gas natural (21,9%) y petróleo (4,8%) (*International Energy Agency*, 2013, p. 24).

La electricidad global también es obtenida a partir de fuente hídrica (15,8%) y nuclear (11,7%). En 2000, Estados Unidos contaba con el mayor número de plantas con capacidades en exceso de 1 GW como también la mayor capacidad instalada (98,5 GW), seguido por Canadá (66,8) y China (65,1 GW). En el siguiente año, China superó a Canadá y para el 2002, estos países constituían el 43 por ciento de toda la capacidad instalada y 44% de toda la hidroelectricidad, la cual abastecía 17 por ciento de la electricidad global. La hidrogeneración es muy importante para muchos países modernizados, la participación es cerca de 90% en muchos países

africanos y entre 80 y 90 por ciento en los países de Suramérica. En países como Austria, Brasil, Nueva Zelanda, Noruega y Suiza, la mayor parte de la electricidad proviene de origen hídrico, mientras que en Francia 75% de su energía eléctrica corresponde a la nuclear (Kostic, 2007, p. 8).

Desde el lado del consumo de energía final, el petróleo representa 40,8%, seguido de la electricidad y el gas natural que componen 17,75 y 15,5% respectivamente. El carbón, los biocombustibles y residuos, no tienen tanta relevancia toda vez que contribuyen con 10,1 y 12,5% cada uno; en menor medida están la fuente solar, la geotérmica y la eólica, entre otras, que en conjunto integran 3,4% (*International Energy Agency*, 2013, p. 28).

En 2011 se consumieron 4.244 Mtoe más de energía final que en 1973, lo cual corresponde a una variación aproximada de 90%, en donde se pasó de consumir 4.674 Mtoe en 1973 a 8.918 en 2011.

El crecimiento de consumo energético mundial durante lo corrido del siglo XXI ha sido constante desde el año 2000, mas en 2009, se registra un declive como consecuencia de la volatilidad de los precios de la energía que impactaron el mercado global. Entre 2010 y 2012 se viene presentando tasas positivas de crecimiento aproximadas a 5,6, 2,4 y 2,1%, respectivamente. La cifra correspondiente a 2012 muestra una disminución, producto de los eventos que acontecieron en la economía global y como respuesta a los altos precios de los combustibles fósiles que resultaron en tasas de crecimiento inferiores a la media mundial (UPME, 2013, p. 14).

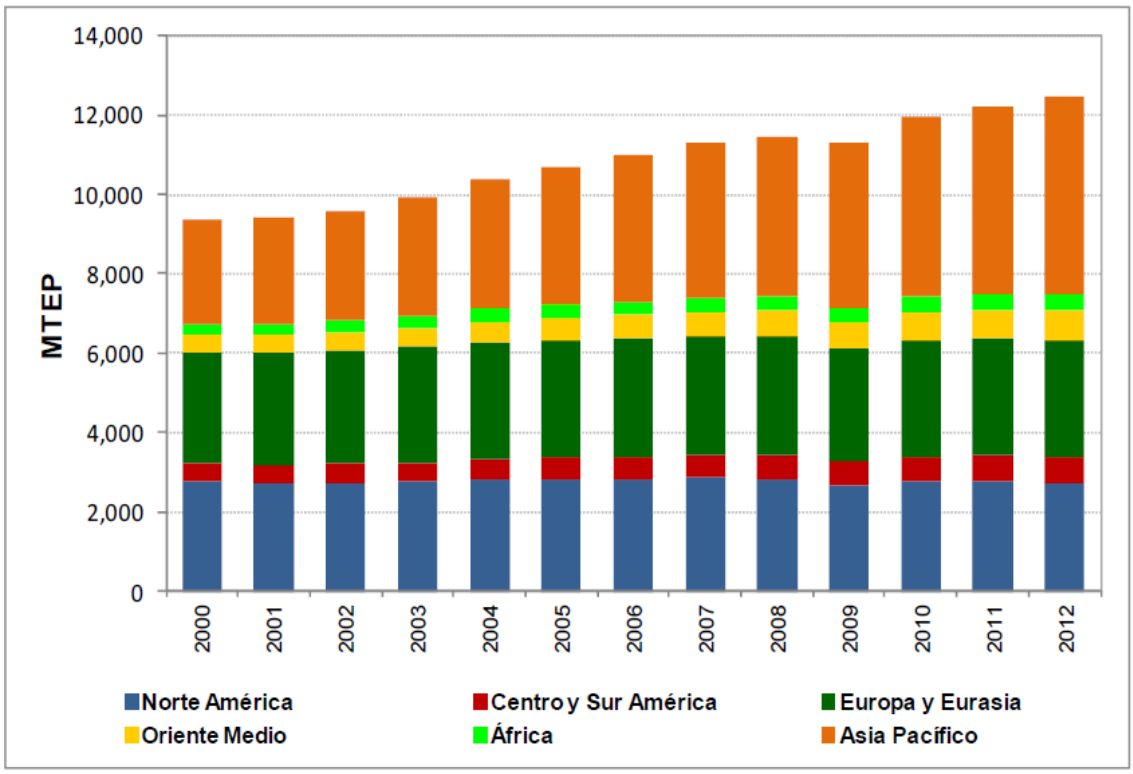
El consumo de energía en 2012 alcanzó la cifra de 12.477 millones de toneladas equivalentes de petróleo, lo cual indica un incremento de 2,1% con respecto al 2011. Otro aspecto a destacar es que parte del incremento del consumo entre 2011 y 2012, fue gracias a energías renovables, cuya participación pasó de 8,2% en el año 2011 a 8,6% en 2012; así como también se registra una reducción de la participación de la energía nuclear, que en 2012 alcanza una proporción relativa de 4,5%, luego de mantener una cifra que superaba el 5,5 por ciento. Esto

se debió al terremoto y el tsunami ocurrido en Japón así como al efecto del cierre de plantas nucleares en Europa (UPME, 2013, p. 14).

Ahora bien, conviene hacer una mirada al consumo energético por regiones a nivel mundial. Según las estadísticas económicas de años recientes, se puede diferenciar notablemente entre dos ritmos de crecimiento: por un lado, es acelerado en los países emergentes y en desarrollo, de otro, es lento en las economías avanzadas y guardan relación directa con el consumo de energía (UPME, 2013, p. 14).

La Figura 1.5 representa la evolución del consumo mundial de energía en las diferentes regiones geográficas desde 2000 hasta 2012. La región de Norteamérica incluye los consumos de Canadá, México y Estados Unidos, la región de Asia-Pacífico se compone de los países de la región incluyendo a China, Indonesia, Australia y Nueva Zelanda. Desde el año 2000 hasta 2012 el crecimiento del consumo anual a nivel mundial fue de 2,1 por ciento. Es de aclarar que cada una de las regiones presenta comportamientos diversos que van desde variaciones anuales promedio de -0,1% por ciento para Norteamérica entre el período 2000-2012, a las de Asia-Pacífico que fueron en promedio anual de 5,5% para el mismo lapso de tiempo, destacándose que entre los años 2011 y 2012 el crecimiento de esta zona fue de 5,0 por ciento (UPME, 2013, p. 15).

Figura 1.5 Consumo mundial de energía por regiones (2000-2012)

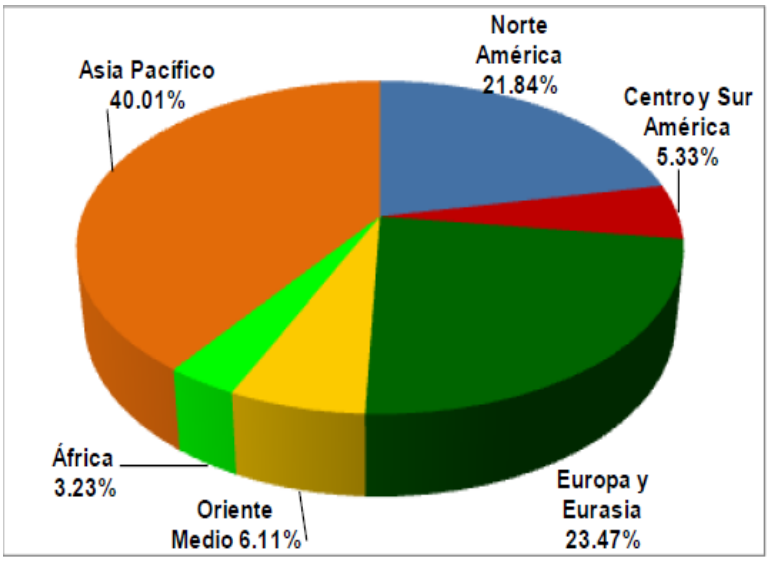


Fuente: *BP*, *Statistical review of world energy* (2013)

En general, la región Centro y Sur de América mostró un comportamiento positivo. Entre los años 2011 y 2012 el incremento fue de 2,43% como resultado de las altas tasas de crecimiento en el consumo energético de Perú (8,24% en 2012) y Chile (6,7%) (UPME, 2013, p. 16).

Para 2012, la participación del consumo energético en las diferentes regiones es representada en la Figura 1.6. Asia-Pacífico es la región con mayor consumo energético en 2012, acaparando el 40,01% del total, seguido de Norte América con 21,84%.

Figura 1.6 Participación relativa del consumo energético en 2012



Fuente: *BP, Statistical review of world energy* (2013)

Asia, Europa y Latinoamérica participan con setenta por ciento del consumo mundial, mientras que Norteamérica, Medio Oriente y África suman el 30% restante; solo Estados Unidos constituye 18 por ciento de la demanda total mundial y 12% se distribuye entre México, Canadá y las zonas de Medio Oriente y África (UPME, 2013, p. 16).

Las estadísticas observadas anteriormente indican de forma escueta una sociedad dependiente por combustibles fósiles, mientras que las fuentes renovables están lejos de tener mayor influencia en el mundo actual e incluso en un futuro cercano. De cualquier manera, es mejor hacer una breve revisión a las proyecciones que se han efectuado en torno a la composición de la cesta energética en el mediano y largo plazo.

- **Prospectiva mundial de energía**

El crecimiento dinámico de la economía y la población induce al aumento de la demanda energética para satisfacer las necesidades de producción y de la sociedad. Este contexto evoca a garantizar la provisión en el largo plazo de otras sendas energéticas que, a su vez, sean menos contaminantes y que suministren energía de manera cabal a la comunidad mundial.

Según la IEA la demanda de energía está correlacionada estrechamente con la actividad económica, dando paso a que las estimaciones o proyecciones de energía estén vulnerables a los supuestos sobre la tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) a nivel mundial. El escenario económico incluye estimaciones del PIB global basados en los análisis del Fondo Monetario Internacional (FMI), aduciendo tasas de crecimiento de 3,5% promedio entre 2011-2035 (UPME, 2013, p. 24).

Igualmente, la IEA señala que el comportamiento de la demanda energética mundial es incierto debido a factores clave en el mercado energético que no son fáciles de predecir como los precios. Además, las políticas de los gobiernos también inciden en la incertidumbre, especialmente cuando se implementen medidas para mitigar los efectos nocivos sobre el medio ambiente como el cambio climático o se tomen decisiones sobre la energía nuclear y la fijación de precios de los recursos energéticos (UPME, 2013, p. 24).

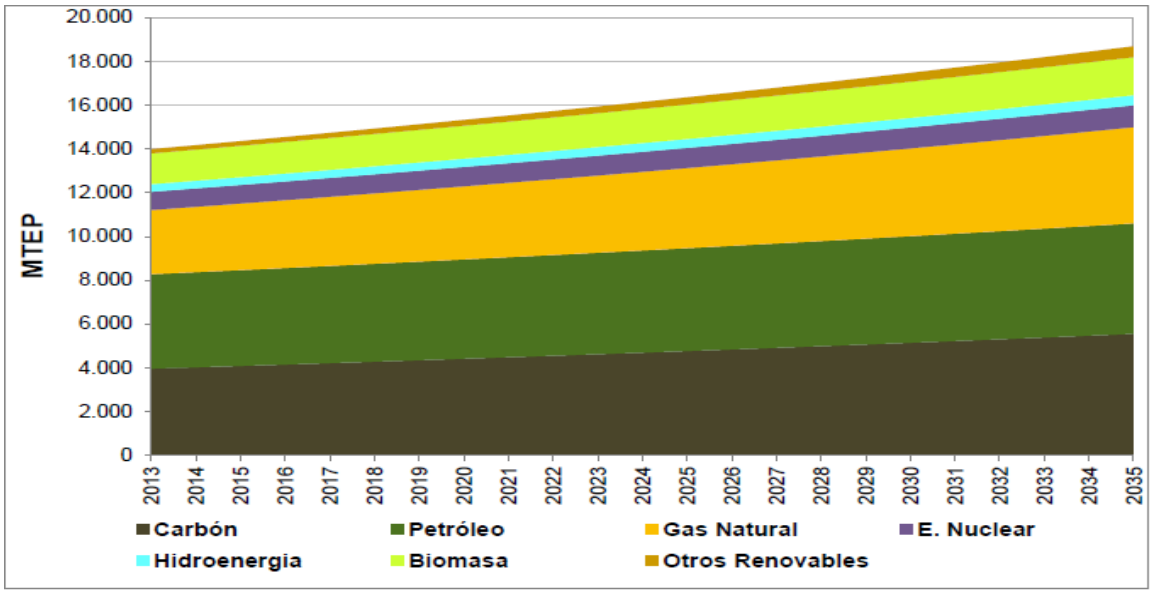
Otro de los factores clave en el crecimiento del consumo energético está relacionado con el incremento de la población que incide directamente a través de su impacto en el tamaño de la demanda energética, y de forma indirecta a través de su efecto sobre el crecimiento económico. Según las estimaciones de la IEA, el consumo energético para el año 2035 podría alcanzar la cifra de 8.600 millones, lo que significa 1.7 millones nuevos de consumidores con respecto al 2011 (UPME, 2013, p. 24).

En cuanto al crecimiento demográfico, la expectativa para el año 2050 es que el número de habitantes en la tierra llegue a 9.000 millones y, como consecuencia, se demandará mayor suministro de energía, calculada en el orden del 30% sobre los niveles actuales, esto con base en las estimaciones de *Energy Information Administration* (EIA). La mayor parte del incremento de la población mundial se espera que ocurra principalmente en Asia y África.

En síntesis, la Figura 1.7 representa la proyección sobre el consumo mundial de energía primaria por fuente. Ésta indica que la tríada fósil compuesta por petróleo, carbón y gas natural seguirán atendiendo los requerimientos energéticos de la sociedad, constituyendo aproximadamente 81% en 2035.

Figura 1.7 Proyección del consumo mundial de energía primaria

(2013-2035)



Fuente: *IEA, World energy outlook* (2012)

El gas natural será el fósil con mayor crecimiento anual con 1,94% y con un aumento total entre 2013 y 2035 de 52,7 por ciento. En cuanto al carbón, su crecimiento medio anual será una proporción de 1,6. En contraste, el petróleo es el

que menor incremento muestra para ese lapso de tiempo con 0.74% en promedio anual. De cualquier manera, se resalta que la demanda de energías renovables mostrará un ritmo más dinámico, alcanzando una tasa media de crecimiento de 1,96% cada año (UPME, 2013).

El incremento del uso de la energía provendrá principalmente de las economías emergentes de países no OCDE.[27] Se calcula que el crecimiento del consumo será 37% para los pertenecientes a la OCDE y 63% para los no miembros. De estas zonas geográficas se destaca el crecimiento de consumo de la región asiática con 68% en los 23 años de proyección, seguida de Centro y Suramérica con 55 por ciento (UPME, 2013).

- **Los recursos naturales no renovables: su finitud y los efectos negativos sobre el medio ambiente**

Aunado a la producción y consumo de los recursos no renovables, hay dos aspectos consustanciales que vale la pena referir: por un lado, el agotamiento de sus reservas y del otro, los efectos nocivos sobre el medio ambiente.

En referencia al primer aspecto se debe señalar nuevamente que los combustibles fósiles son finitos. Estos recursos requirieron de millones de años para acumular, sedimentar y transformar animales para formar petróleo, gas y carbón (Gómez, Vargas, y Posada, 2007). La preocupación es que las sociedades energético-intensivas están socavando los recursos, de hecho los datos indican que para el caso del petróleo, cada año se usa de dos a cuatro veces más de este combustible que lo que se encuentra (Hall y Klitgaard, 2012), por consiguiente, la perspectiva futura es que las fuentes de energía inorgánica lleguen a un punto final.

El otro aspecto es el que concierne a las emisiones de dióxido de carbono. Las consecuencias ambientales de producir, mover, procesar, quemar carbón e

[27] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), agrupa a 34 países miembros.

hidrocarburos y la generación de electricidad nuclear e hidroelectricidad, recogen un enorme rango de cambios indeseables. Las emisiones antropogénicas de hidrocarbono resultan de la combustión incompleta de los combustibles, como también de la evaporación de los combustibles y solventes, la incineración de residuos y el desgaste de los neumáticos para los automóviles (Smil, 2003).

Las estadísticas del informe de energía de BP (*British Petroleum*, 2012) indican que la generación de CO_2 en 2011 fue de 34,032.7 millones de toneladas (Mt), lo cual refleja un aumento de 16.912,8 con respecto a 1973. Los países que tienen mayor incidencia en este índice son China y Estados Unidos con 26,4 y 17,7% respectivamente, cifras coherentes porque son estas mismas naciones las que más consumen energía primaria con una participación de 21,3 y 18,5% correspondientemente. Dichas emisiones generan la concentración de gases con efecto invernadero, que en los últimos años, se ha incrementado debido al intensivo y masivo uso de los combustibles fósiles, provocando mayores cambios en la temperatura de la tierra, es decir, cambio climático y cambios en las pautas de precipitación pluvial. Como lo expone Ruiz (2011), actualmente el cambio climático representa uno de los mayores efectos adversos que ocasionan las actividades humanas y económicas; para las economías del globo, independientemente de su grado de desarrollo, ubicación y estructuras productivas, el cambio climático es la externalidad negativa más grande a la que deben enfrentarse.

En suma, lo anterior apunta a dos consideraciones que deben mencionarse: de un lado, el descubrimiento del petróleo y el dominio del fenómeno eléctrico, establecieron el complejo aparato productivo que hoy prevalece, por esto son las formas de energía más utilizadas en el mundo. No es de extrañarse que este tiempo se denomine la era del petróleo y la electricidad, que se dieron de manera paralela y aportaron elementos fundamentales para crear el mundo moderno. Estas fuentes energéticas han permitido la mecanización de la producción industrial, se han creado grandes centros urbanos, se ha dado paso a la globalización del comercio y la cultura. Además la disponibilidad y mayor acceso a la energía ha permitido incrementar los niveles de vida de la población, sin embargo, este proceso no ha

sido igualitario. Con el alto nivel de vida de la sociedad está asociado un alto consumo de energía, de hecho las cifras muestran que 10 por ciento de la gente más rica del mundo consumía más de 40% de toda la energía primaria comercial (Smill, 2004, p. 557). De otro lado, lo anterior instiga a pensar en una transición del uso del crudo hacia otras fuentes de energía, y si bien se sabe que será una larga y difícil labor, un punto clave para llevarlo a cabo es replantear las bases sociales y económicas. Las opciones de mitigación del cambio climático están asociadas con los factores que lo originan: el crecimiento de la población, la urbanización, el incremento de la producción y consumo, la estructura productiva y las tendencias de eficiencia energética y de innovación tecnológica, todos estos están relacionados de alguna manera con las actividades económicas.

Adicionalmente, se debe contemplar la finitud de los recursos naturales, y si bien se estima que aún existen yacimientos de petróleo, éstos no son de la mejor calidad lo cual implica mayor costo energético para su extracción y refinación. La capacidad de los combustibles fósiles depende también de la calidad de la energía, ya que determina la cantidad de la misma, que una sociedad requiere para el proceso de producción. En este sentido, se apuntala no solo en el volumen de reservas de recursos energéticos que posee un territorio, sino en sus atributos cualitativos o la capacidad calorífica que pueda contener.

De cualquier manera, la cuestión es qué pasará con el desarrollo del proceso productivo cuando éstos empiecen a escasear o cuando el rendimiento energético sea menor que el costo requerido para obtenerlo, en ese caso se estaría generando una pérdida neta de energía. Esta situación crea el temor de la escasez energética a nivel mundial, el cual tendría consecuencias trascendentales a nivel económico y social según estudios empíricos y teóricos realizados en la frontera del conocimiento (Hall y Klitgaard, 2012, p. 74). Si la producción de crudo se reduce paulatinamente durante el siglo XXI, no sería posible satisfacer la demanda requerida, y resultaría en una crisis económica, básicamente para los países más dependientes de este combustible fósil.

Lo anterior evoca hacia una transición energética que contemple el uso de recursos renovables, principalmente la fuente solar. Es ideal y necesario construir una nueva era de post-combustibles fósiles en la que se desarrollen formas de energía alternativas que prometen potencial, en que se mejore su conversión, su uso eficiente, así como también el ser humano reconsidere su modo de vida y reduzca el uso de la energía, lo cual disminuiría la contaminación y la presión sobre el planeta tierra.

Uno de los elementos guía para determinar el agotamiento de recursos ha sido la del mercado como mecanismo que asigna eficientemente los precios. En ese caso, cuando el petróleo empiece a escasear, su precio se elevará hasta un punto que generará un desincentivo en la demanda de este combustible, y es en tal momento en que se iniciará quizás la búsqueda de otras alternativas. Ello advierte una preocupación sobre la labor que desempeñan tanto los economistas ambientales como los gobiernos, de tal manera que intensifiquen el uso de fuentes de energía que minimicen el daño ambiental, es decir, que gestionen la transición energética de fuentes no renovables a unas de origen renovable antes que finalice la era del petróleo.

Capítulo 2

La energía en el marco conceptual de la economía clásica y neoclásica

Como antecedente del nacimiento de la escuela clásica es necesario mencionar que Francia se caracterizaba por ser predominantemente agrícola y porque allí se consolidó la primera escuela del pensamiento económico, la *Fisiocracia* que data del siglo XVIII. Esta escuela prevaleció solo en la nación francesa porque Inglaterra y el resto de Europa, se orientaron más por el comercio a larga distancia dada la flota marítima con las Provincias Unidas, pasando de la escuela Mercantilista a la Clásica.

Fue Quesney, un médico cirujano de profesión, quien se dedicó al análisis economicista y fundó la primera escuela del pensamiento económico. Su idea de producir no solamente se basaba en revender con beneficio, sino contribuir al aumento de esas riquezas renacientes dando lugar a un producto neto físico (por ejemplo, se plantaba un grano de trigo y se obtenía una espiga con muchos granos) expresable también en términos monetarios. De tal manera, el crecimiento material se situaba en términos físicos no sólo de las riquezas renacientes, sino de la propia tierra que las generaba, indicativo de un crecimiento cuyo objeto era desarrollarse sin el deterioro de los bienes de fondo (tierra), es decir, de modo sostenible.

De acuerdo a la fisiocracia, el sector agricultor se considera como el único sector productivo, mientras que el comercio y la manufactura se suponían estériles.

Desde el sector comercio, se suponía que éste no generaba nuevo valor ya que se limitaba a transferirlos, y analizando el sector manufacturero, Quesnay afirma que el valor de esas mercancías apenas cubre los costos de materia prima y los costos salariales, sin dejar ningún excedente bajo la forma de beneficio del capital y que fuera capaz de incrementar la riqueza. La noción fisiocrática presupone que el eje central es la productividad física de los sectores extractivos, es la agricultura la única actividad productiva de excedentes, denominándolos como producto neto. De aquí que se acentúe cómo la generación de la renta de la tierra influía en la derivación de los ingresos manufactureros y de los comerciantes y prestamistas, observación expresada en el *tableau economique*. Sobre la consideración anterior, debe añadirse que la producción agrícola tiene ese lugar privilegiado precisamente por ser la única en generar excedentes para inversión, ello deriva en que el objetivo era alcanzar la máxima riqueza posible para así tener un mayor nivel de acumulación de capital.

En relación con otros planteamientos, los fisiócratas consolidaron una interpretación de los fenómenos económicos a partir de sujetos o leyes. Para Quesnay, la mejor legislación *consiste, pues, en la declaración de las leyes naturales constitutivas del orden evidentemente más ventajoso posible para los hombres reunidos en sociedad* (Cuevas, 1993). Su enfoque encuentra que las leyes naturales funcionan de forma independiente del libre albedrío humano y sí el hombre actúa conforme a estas leyes naturales, entonces el bienestar social sería maximizado. Los fisiócratas exponen que la sociedad tiene en estado latente, un conjunto de relaciones que garantizan el orden más ventajoso cuando los hombres están reunidos en sociedad.

Esta escuela económica reconocía el papel de la tierra en la producción de la riqueza y, por esto, se le puede atribuir como una teoría referente para la economía ecológica porque sí comprendía los límites biofísicos del entorno natural (Gómez y Posada, 2003), y si bien estaba integrada con la perspectiva física, carecía de herramientas para la gestión de los recursos, lo cual generó posiciones críticas y abrió paso hacia el concepto de valor de cambio en el contexto de la escuela

clásica, elemento trascendental que serviría para cifrar lo ocurrido en el proceso económico.

Ante las reprobaciones sobre el planteamiento de la producción fisiócrata, se propusieron otras perspectivas indiscutibles orientadas hacia el progreso, en donde el sistema económico fue desplazándose hacia los valores pecuniarios o de cambio. Antes de entrar en el análisis de los economistas clásicos, se reseñarán los antecedentes del capitalismo agrícola en Inglaterra.

2.1 El capitalismo agrícola en Inglaterra

El desarrollo urbano y comercial de la Baja Edad Media en Inglaterra, suministró los elementos para que se efectuara la transición desde un sistema feudal hacia un sistema capitalista. Hacia el siglo XV un número significativo de campesinos se inclinaron por la explotación ganadera y dependían del mercado para satisfacer sus necesidades básicas de alimentos. Además, el tamaño de las unidades de producción agraria se incrementó en esta centuria, pero a la par, se reduce el número de campesinos y el precio de la tierra, concentrando este recurso en pocas manos. Los arrendatarios integraron un grupo de empresarios agrarios que en su mayoría eran de origen campesino y en la búsqueda por obtener un beneficio propio y generar las rentas para pagar la renta de la tierra y pagar los salarios, crearon nuevas formas de producción y de comercialización agraria. Las labores de los arrendatarios parecen tener ciertas características capitalistas, marcando el fin del régimen señorial.

El capitalismo sentó sus lineamientos alrededor de las iniciativas del campesinado, estos dejaron de ser oprimidos y obligaron a sus señores a hacer concesiones. La crisis de la Baja Edad Media desató una revolución en las minorías y brindó la oportunidad para transformar la economía de Inglaterra en un sistema capitalista temprano, eliminando los preceptos y las dinámicas estáticas en la producción agrícola que imponía el feudalismo (Dyer, 1998). El sistema económico

del siglo XV creó algunas de las condiciones para afianzar el posterior capitalismo fabril.

La revolución en Inglaterra durante la centuria del XVII dio paso a conformar una República, cuyas diferencias en relación con el sistema feudal, es que se establecieron derechos de propiedad privada y se constituyeron nuevas clases sociales. Esto posibilitó que Inglaterra tuviera un desarrollo agrario, manufacturero y capitalista más avanzado que otras naciones, hechos que los pensadores de la época se dedicaron a analizar, como los economistas clásicos.

2.2 La energía en el marco conceptual de la teoría económica clásica

Hacia finales del siglo XVIII, la economía británica pasó de ser predominantemente agrícola y artesanal a industrial, período en el que se estableció la teoría económica clásica con la publicación del libro *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations* de Adam Smith, en 1776. Es así como el surgimiento de la Revolución Industrial dejó atrás a la agricultura, en el caso de Inglaterra lo que aconteció fue una transición desde la teoría del capitalismo agrícola por la teoría clásica de un capitalismo de producción industrial (Gómez y Posada, 2003, p. 101). Es de anotar que Smith tuvo influencia del pensamiento Fisiócrata merced de su experiencia en Francia cuando dicha escuela estaba en auge y aunque tomó elementos de ese pensamiento, también refutó algunos de sus planteamientos como el de los excedentes económicos que proporcionaba la agricultura. Es bien sabido que Smith retoma la filosofía del “orden natural” para afirmar que cada quien, buscando su propio interés individual (egoísmo) puede contribuir al bienestar social a lo que definió como la mano invisible.

Analizando el contexto de la economía de Inglaterra con los postulados clásicos, Adam Smith sugirió que el origen del valor de la sociedad agrícola podía encontrarse tanto en la bondad de la naturaleza y el trabajo agrícola, como en el

trabajo general y la productividad. Para Smith, la riqueza podía incrementarse sólo gracias a la productividad del trabajo, objeto que estudió amplia y profundamente concluyendo que la causa inmediata era la mayor especialización funcional que estaba enmarcada por otros dos aspectos a saber: el mayor tamaño del mercado para el productor individual y la acumulación de una mayor cantidad de capital fijo y circulante (Wrigley, 1992, p. 39).

Para la escuela económica clásica existen tres factores de producción: el trabajo, el capital y la tierra, en donde la oferta de los dos primeros se podría expandir dependiendo de las circunstancias, mientras que el factor tierra era fijo. Para los autores de esta corriente, la acumulación de la tierra, capital y trabajo determinaban la generación de riqueza y por consiguiente, estaba limitada por la disponibilidad de los mismos. A pesar de comprender esos límites, no expusieron alternativas para evitar que la economía se restringiera por el factor tierra.

Adam Smith y David Ricardo entendían al trabajo como el factor determinante de la riqueza, aunque también reconocieron que la tierra era relevante. Para ellos, este último factor era esencial toda vez que proporcionaba valor de uso, esto es, productos útiles tales como comida, fibra, minerales y energía (Hall y Klitgaard, 2012). Identificaron la dependencia de la sociedad por la tierra como fuente de energía, en este sentido admitieron que el crecimiento de la población, la producción y el consumo material resultaba inviable a largo plazo si la tierra no crecía, sugiriendo que el sistema económico llegaría a un estado estacionario. Aunque la tierra se entendió como un factor fundamental en la producción, la energía explícitamente no se consideró, aunque se reconoce en esta tesis que la tierra es una forma de tener energía acumulada.

Según Adam Smith, existía una retroalimentación positiva entre la agricultura y la manufactura ya que los alimentos y las materias primas baratas, permitían el desarrollo de la manufactura. Dicho desarrollo estimulaba a los agricultores locales para que fueran más eficaces y obtuvieran mayores volúmenes de producción, este resultado, igualmente, fomentaba la producción manufacturera. De ese modo, la población se concentraba en lugares en los que el acceso a las materias primas

fuese fácil, así como se establecían factorías que convertían a pequeños poblados en ciudades. Estas grandes urbes serían el núcleo en el que se presentaría la denominada Revolución Industrial (Wrigley, 1993, p. 62). De Smith debe decirse que era un economista capaz de entretejer y analizar las dinámicas de las variables económicas y sociales. Al comprender que la oferta de tierra era fija y la población estaba en continuo crecimiento, se preocupó por los límites biofísicos y las restricciones que esto le imponía al crecimiento. Es decir, se alcanzó a visualizar por parte de la escuela clásica, la finitud de los recursos naturales.

Es interesante el hecho de cómo Smith relaciona los distintos sectores productivos y los pone como complementos, también es bueno mirar cómo interpreta la relación entre el factor trabajo y el capital. Para él, la división del trabajo dependía de la acumulación de capital y del tamaño del mercado. De un lado, la división del trabajo en un sistema de producción, estaba en función del ahorro que también fue definido como capital y servía para cubrir los gastos necesarios para alimentar, vestir y albergar a los trabajadores durante el proceso productivo. Eso plantea que el nivel de acumulación de capital es el que va a establecer el nivel en que puede efectuarse la división del trabajo; es decir, esos factores se complementan para lograr un sistema de producción eficiente. De otro lado, debe mencionarse la relación entre el trabajo y el tamaño del mercado puesto que si este último era mayor, el volumen de venta y de producción impulsaba a organizar y definir funciones de trabajo, es decir, especialización de labores.

Ahora bien, la contribución de Marx a la teoría del valor fue la de la plusvalía. Su argumento principal era que la ganancia estaba determinada por la capacidad de los capitalistas de aumentar la productividad laboral y el beneficio se apropiaba como capital para distribuirlo a los trabajadores así que la rentabilidad obtenida debería reinvertirse en más tecnologías productivas, esto porque para Marx, el nivel de inversión origina un cambio en las estructuras productivas. Según Marx el precio o el valor podía ser determinado objetivamente por agregar el valor en la maquinaria (el cual llamó capital constante), el dinero anticipado para comprar la fuerza de trabajo (denominado capital variable) y una parte de la plusvalía social

(Hall y Klitgaard, 2012, pp. 109, 110). Lo anterior es indicativo de que para Marx, el progreso tecnológico induce al mejoramiento y eficiencia de la producción, omitiendo y no especificando que la finitud de recursos naturales puede ser un obstáculo para la realización de dicha producción; puede decirse que todo lo reduce a la inversión bruta de capital como forma para alcanzar mayores niveles de crecimiento económico. Sus argumentos muestran que los límites de la tierra no constituían una restricción al crecimiento económico, incluso expone que las innovaciones tecnológicas serían capaces de impedir la llegada del estado estacionario. Marx planteó tácitamente la existencia de perfecta sustitución entre tecnología y recursos naturales.

En cuanto a David Ricardo, él argumentó que más allá del problema del crecimiento de la riqueza, se debía analizar el problema de la distribución de la renta con el paso del tiempo. Este interés suscita a resolver esta cuestión por medio de una teoría residual de la distribución de la renta, en donde esa renta es determinada por el precio y en el margen: por el costo de producción de la tierra menos fértil (en donde no hay rentas). Pero la distribución de la renta no sólo constituía un problema de estudio para él, se preocupó por el hecho que la economía podía llegar a un posible estado estacionario debido a la Ley de los Rendimientos Decrecientes, cuyo cumplimiento estaba dado por el aumento de la población sin permitir la ocupación de tierras productivas y reduciendo las rentas de la tierra. El sistema ricardiano entonces, estaba en función de la teoría malthusiana de la población.

Uno de los aspectos clave que se derivan del análisis económico ricardiano es que el hecho de tener una cantidad fija de tierra, implicaba que a medida que se agregaban unidades de capital y trabajo, el producto marginal se reducía. Esto abre paso a postular que el progreso tecnológico en la agricultura podía contrarrestar exactamente, contrarrestar con creces o no lograrlo a corto plazo, indicando que los rendimientos podían ser constantes, crecientes o decrecientes en el largo plazo. Ricardo y los autores posteriores creían que el cambio tecnológico no sería capaz de compensar los rendimientos decrecientes, de hecho pensaban que esos

rendimientos seguirían esa tendencia a través de la historia. Quizás los datos de Inglaterra no fueron evidencia de lo formulado por Ricardo, y a pesar de ello, seguían defendiendo su modelo y su predicción de que los rendimientos se reducirían algún día.

Los economistas clásicos analizaron la contribución de la tierra en la economía y su generación de excedentes económicos. Adam Smith explica tal creación de excedentes de la siguiente forma: *en la agricultura la naturaleza trabaja sólo con el hombre* mientras que en la manufactura *la naturaleza no hace nada; todo lo hace el hombre*[28]; esto es indicativo que para Smith la riqueza ya no estaba determinada por el excedente físico que generaba la tierra, sino que estaba en función de la acumulación de la producción en un período de tiempo, que al tiempo, dependía de la división del trabajo, es decir, del grado de especialización de cada trabajador. Por su parte, Jean-Baptiste Say plantea que la riqueza estaba determinada por la fuerza de trabajo o la industria del hombre, además reconocía que el trabajo humano estaba asociado con la acción de los agentes naturales. Así mismo, David Ricardo manifestó que la naturaleza siempre obró con el hombre tanto en la agricultura como en todos los procesos, por ejemplo, con el viento y el agua (Gómez y Posada, 2003, pp. 112, 113).

La teoría clásica reconoció la importancia de la naturaleza en la economía. Expusieron que la mano de obra y el capital trabajan con la tierra concediéndole importancia a la naturaleza, como factor elemental para la producción. Otra forma de entender esa importancia era suponiendo que la tierra para algunos clásicos era cantidad total fija y para otros, que era una cantidad variable.

En tanto que para Karl Marx la naturaleza no es considerada en la determinación de los valores de cambio, para él este valor está en función del trabajo invertido en una cosa o mercancía (Naredo, 1987, pp. 162, 164). La omisión de los procesos físicos en la economía desde la perspectiva de Marx y Engels no se debe a su desconocimiento de las ciencias naturales, incluso ellos estaban

[28] Citado por Alam (2006, p. 5), original de Adam Smith (1776: II.5.12).

documentados sobre la evolución y aceptaban la teoría darwinista y el primer principio de la termodinámica, mas rechazaron la ley de la entropía como fundamento para analizar el papel de la energía y la materia en el sistema económico, ya que no les parecía coherente que se perdiera el objeto de la ciencia económica que se había implantado con la economía política (Naredo, 1987, p. 164). Según Costanza et al. (1999), Marx y los pensadores de su corriente han influido de manera negativa en la asignación eficiente de los recursos porque la exclusión de la naturaleza y sus leyes asociadas causaron gran parte de la destrucción ambiental en los países comunistas.

De la anterior matización sobre Marx y Engels, puede inferirse que concebían una visión teórica separada entre lo económico y lo físico, entre la economía y el estudio de los procesos físicos, ni siquiera implícitamente admitieron a la naturaleza como generadora de valor y como factores vitales en la economía. En contraste, cuando algunos clásicos se refieren a la *fertilización de la naturaleza* (Adam Smith), *los poderes productivos e indestructibles del suelo* (David Ricardo), o cuando se hablaba de *la tierra como un maravilloso taller químico en que muchos materiales y elementos se mezclan y trabajan juntos* (Jean-Baptiste Say),[29] están reconociendo tácitamente la contribución de la naturaleza como fuente de energía. También se deben incluir los aportes de Jhon Stuart Mill quien fue el primero de los economistas en abogar por la conservación de la biodiversidad, él se oponía a convertir todo el capital natural en capital hecho por el hombre (Costanza et al., 1999, p. 36). Mill concebía que la economía alcanzaría una madurez y estabilidad en el cual la población sería capaz de disfrutar los beneficios de sus ahorros anteriores.

Para Smith, Malthus y Ricardo los hombres debían multiplicarse en proporción a sus medios de subsistencia, igualmente, creían que la tierra era la fuente principal de materias primas industriales no menos que de alimentos, para el tejido, la

[29] Citado por Alam (2006, p. 5).

vivienda y el fuego (Wrigley, 1992, p. 47). De esa manera, la tierra podría satisfacer directa e indirectamente la mayoría de las necesidades humanas.

Según los clásicos las dos fuentes de mayor productividad son la división del trabajo y la introducción de maquinaria, estamento ante el cual académicos críticos como Wrigley (1992, p. 57) manifestaron lo siguiente:

> *es difícil considerar que los cambios en la productividad procedentes del efecto combinado de estas dos fuentes proporcionen el impulso para una revolución industrial, a menos que se añada un tercer factor, y un factor sobre el que los economistas clásicos tuvieron muy poco que decir, en contraste con su comprensión y exposición sobre los dos primeros factores.*

El tercer factor al que Wrigley se refiere es el empleo de fuentes de energía no vivas a gran escala y de forma creciente. Para Wrigley (1992, 1993), a pesar que los economistas clásicos habían hecho hincapié en que las mejoras en la productividad de la economía podían lograrse mediante la especialización del trabajo, la maquinaria y los avances en las técnicas de la producción, no se habían enfocado en el uso de energía por trabajador y del desarrollo de nuevas fuentes energéticas, un tema importante para comprender la conexión con el proceso de Revolución Industrial. Este autor argumenta que la escala de producción de un trabajador está determinada por la cantidad de energía de la que dispone.

De cualquier manera, es loable resaltar de los clásicos que entendían al crecimiento económico en función de las limitaciones derivadas de la posición de la tierra en el esquema general de producción; es decir, comprendían la finitud de la oferta de tierra y preveían que en algún momento su deterioro haría que se elevarán los costos de producción de una unidad marginal.

Los clásicos aceptaron la finitud de los recursos energéticos y naturales al reconocer que la tierra tiene un límite y que sus rendimientos son decrecientes.

También es de anotarse que la época en la que se desarrolla la escuela clásica, la agricultura dejó de ser el principal sector económico y a partir de la Revolución Industrial, la fábrica y la estructura de mercado se convirtió en el eje central.

2.3 La energía en el marco conceptual de la teoría económica neoclásica

La teoría neoclásica surge dentro del contexto positivista y en medio de las novedades de la física y la química que producen el campo de la termodinámica y el de las matemáticas (Gómez y Posada, 2003). Antes de 1870, la escuela clásica todavía consideraba implícitamente a la tierra como un factor productivo, de lo que puede decirse que tenía una perspectiva biofísica de la economía, pero a partir de entonces, esta óptica se quebrantó debido al surgimiento de la revolución marginalista que introdujo nuevas herramientas al análisis del sistema económico clásico, como el uso de las matemáticas porque le permitían tener mayor precisión y coherencia. En este sentido, la escuela neoclásica pretendía elevar la economía a la categoría de ciencia físico-matemática (Naredo J. M., 1987).

En el planteamiento neoclásico inicial se puede referenciar académicos como Jevons, Walras y Pareto quienes se basaron en las ciencias físico-matemáticas, pero no para análisis físicos, sino sociales y fundamentalmente psicológicos que según ellos era posible cuantificar (Gómez y Posada, 2003, pp. 133, 134). Walras fue pionero en la teoría neoclásica, su trabajo es referente en esta escuela y básicamente su formación es más completa y estructurada que la aportada por otros estudiosos del marginalismo, para él la riqueza social se definía como el *conjunto de cosas materiales o inmateriales que, por una parte, no son útiles y que, por otra, no están a nuestra disposición más que en cantidad limitada*.[30] Él tiene una continuidad con los economistas clásicos, con la diferencia que su desarrollo

[30] Walras, L., *Elementos de economía política pura o teoría de la riqueza social*, Corbaz, Lausana, 1874 (Edición española de Alianza Editorial, Madrid, 1987), pp. 155-156. Tomado de Naredo (1987, p. 202).

teórico es más formalizado, pero en esencia aduce al igual que sus antecesores en una riqueza definida en función de lo útil (Naredo, 1987, pp. 200, 202).

Por otra parte, se puede destacar la reflexión de Stanley Jevons sobre la finitud de los recursos no renovables como el carbón, Jevons se concientizó sobre los peligros y consecuencias que implicaría la excesiva dependencia de este combustible (Wrigley, 2010, p. 247). Su postura asume una perspectiva física, plasmada en la publicación de 1865 *La cuestión del carbón: una investigación sobre el progreso de la Nación, y el agotamiento probable de nuestras minas de carbón*. Ante este trabajo, Naredo (1987) alude que no aportó nada sobre la posibilidad de usar el análisis energético como una clave orientadora para la gestión de los recursos. Realmente el objetivo de Jevons era que la economía se convirtiera finalmente en una ciencia exacta, definida ésta como una ciencia de mecanismos de cálculo (Georgescu-Roegen N.,1996, pp. 409, 410).

Fue Carl Menger quien se opuso al planteamiento de que la teoría económica necesitaba del uso de las matemáticas y le da mérito al método de las ciencias experimentales y empíricas. De este modo, en la Economía Neoclásica surgen dos corrientes, una en donde se da la prioridad al individuo y es propuesto por Walras, la otra, se enfoca en lo social y es planteado por Menger (Gómez y Posada, 2003, pp. 136, 137). En el aspecto social Alfred Marshall también fue un garante y junto con Pigou, desarrollaron la Economía del Bienestar poniendo en cuestión el principio de egoísmo individualista al que Walras aducía.

Marshall, aunque se clasifica dentro de la corriente neoclásica, tenía ciertas diferencias con respecto a sus colegas en la forma de interpretar la economía. Su tesis es que esta área del conocimiento no puede compararse exactamente con las ciencias físicas ante el hecho de que la utilidad se haya podido cuantificar, para Marshall, esta disciplina no superó a las otras ciencias sociales a pesar del uso de las matemáticas; más aún, dudó de que la noción mecánica de la física haya sido la más adecuada para explicar la economía (Marshall, 1920, pp. 14, 15).

Pigou al igual que Marshall se interesó por la Economía del Bienestar limitándola a lo que puede ponerse en relación directa o indirecta con el patrón monetario de medida, por tanto el bienestar lo redujo al aspecto monetario y lo consideró como una categoría económica. De allí se infiere que así Pigou se haya enfocado en un aspecto diferente al individualista de Walras, de alguna u otra forma, estos pensadores tenían algo en común y es el interés por la medición de la economía, por lo que el dinero se establecía como el eje central de esta ciencia social.

Ahora bien, dejando de lado el discurso implantado desde la perspectiva de la Economía del Bienestar que había cobrado fuerza en buena parte del siglo XX, el interrogante de los economistas del mismo siglo, era explicar el crecimiento económico sostenido que se venía experimentando desde la centuria del XIX, hecho que los clásicos no habían sido capaces de ilustrar. Para los economistas neoclásicos surgía la necesidad de interpretar porqué antes de la Revolución Industrial la economía crecía a un ritmo extremadamente lento, mientras que luego de la Revolución, la producción de bienes empezó a mostrar una tendencia exponencial. Los economistas también se cuestionaban por qué luego de la segunda Guerra Mundial, el sistema productivo de Estados Unidos estaba fortalecido, contrario a lo que sucedió en Europa. La economía americana se caracterizó por un incremento de la demanda de bienes y servicios, particularmente de aparatos electrónicos, por el aumento de la población y la migración rural hacia las zonas urbanas.

En este contexto, la búsqueda por explicar la expansión económica en Estados Unidos fue llevada a cabo por Solow (1956) y Swan (1956), quienes desarrollaron el modelo de crecimiento exógeno como una extensión del modelo de Harrod-Domar (1946), tomando la función Cobb-Douglas.[31] Este modelo indica que la

[31] Es también llamada la función de producción neoclásica porque representa las combinaciones de los factores de capital, trabajo y tecnología y además satisface tres propiedades: 1) Rendimientos constantes a escala, 2) La productividad marginal de todos los factores de producción es positiva, pero decreciente, 3) La función debe cumplir con las condiciones de Inada en la que la productividad marginal del capital se aproxima a cero cuando éste tiende a infinito y que tienda a infinito cuando el capital se aproxima a cero (Sala-i-Martin, 2000, p. 13, 14).

producción (*Q*) está determinada solamente por el capital (*K*) y el trabajo (*L*) y se representa como: $Q = A(K^{\propto}L^{1-\propto})$[32], siendo α y 1- α la participación respectiva del capital y el trabajo en el producto nacional, todo ello en términos monetarios y multiplicado por la constante (*A*) conocida como el progreso tecnológico.

Según la modelación económica de esta representación neoclásica, hay un gran residual estadístico, es decir, cerca de la mitad del incremento en la producción no podría ser explicado por el incremento en el trabajo o el capital, de tal forma que le atribuyeron al progreso tecnológico ser el promotor de la producción que en muchos casos es más del 50% del crecimiento total (Kümmel, 2011, p. 181).

Este tipo de representación supone que no hay razones para creer que el crecimiento en el largo plazo será cero gracias a que la imaginación humana o el acervo de conocimientos no tienen límites. Este modelo sugiere en última instancia que *la economía neoclásica puede tener crecimiento positivo a largo plazo si la tecnología crece* (Sala-i-Martin, 2000, p. 43).

Sin embargo, como este planteamiento supone que el progreso tecnológico es exógeno, es decir no saben cómo explicarlo ni cómo medirlo, la utilidad del modelo se ve reducida porque el crecimiento se basa en aumentos explicados y no explicados de la variable tecnológica, más aún, porque la acumulación de capital físico no es suficiente para explicar ni el enorme crecimiento de la producción per cápita de los países industrializados ni las brechas de ingresos entre las naciones (Sala-i-Martin, 2000). Es de anotar que este modelo presenta ciertas falencias no sólo por considerar a la variable *A* como una constante, sino porque no admite a la energía como el componente fundamental que permite el desarrollo de la tecnología y en general de la producción; lo cierto es que esta teoría económica del crecimiento no se interesó en que a lo largo de la historia de la humanidad, el progreso tecnológico ha sido alimentado por el descubrimiento e intensa utilización de las diferentes formas de energía (Granda, 2006).

[32] Para profundizar en estos modelos, ver Romer (2006) y Sala-i-Martin (2000).

En dicho análisis convencional, la contribución de los factores productivos en la generación física de la riqueza es determinada por la participación de sus costos. Según cálculos estimados, los costos de la energía tenían una representación aproximada de 5 a 6% en la producción total (Hall y Klitgaard, 2012, p. 135). En consecuencia, se ha negado que la energía sea un factor de producción importante por la poca participación que éste tiene.

Lo anterior es indicativo que el modelo neoclásico de crecimiento aduce que la tecnología y la sustituibilidad son factores esenciales para evitar la escasez de recursos naturales. Esto se resume en lo que mencionó Solow (1974): *el mundo puede seguir adelante sin recursos naturales, de modo que su agotamiento es sólo un acontecimiento, no una catástrofe.*[33] El pensamiento de Solow referencia que el crecimiento de la producción no se restringirá en el futuro porque para él, los recursos naturales fácilmente pueden sustituirse.

En este orden de ideas, debido a que el modelo de crecimiento exógeno propuesto por Solow y Swan no ofrecía respuestas contundentes que explicaran el incremento de la producción, surgió el propósito de estudiar la producción con la variable tecnológica como endógena, lo cual fue planteado a través de modelos sencillos como el de la tecnología *AK*, el de Paul Romer (1986) sobre externalidades de capital y el modelo de gasto público (Sala-i-Martin, 2000).

Esta representación endógena de la variable tecnológica establece por un lado, un marco de competencia monopolística que permite remunerar la innovación de los agentes, y de otro, supone externalidades asociadas a la creación de tales innovaciones (Granda, 2006). Una característica relevante de estos modelos son las funciones homogéneas de grado mayor que uno, indicativo de rendimientos crecientes a escala dado el supuesto de no rivalidad de conocimiento tecnológico que garantiza la suficiencia de recursos para financiar las actividades de

[33] Tomado del capítulo de libro de Aguilera y Alcántara (1994) que es la traducción del artículo de Robert M. Solow *La Economía de los Recursos o los Recursos de la Economía*, publicado originalmente en *The American Economic Review*, mayo de 1974 y posteriormente, en El Trimestre Económico, Vol. XLII (2), abril-junio 1975, n.º 166.

investigación y desarrollo, -caso opuesto a la representación exógena del crecimiento- (Granda, 2006, p. 107).

Los diferentes planteamientos endógenos tienen en común, que tanto la acumulación de capital como la innovación, determinan la tasa de crecimiento económico en el largo plazo. Ante esta representación teórica, el problema sigue latente porque abandona la base fundamental sobre la que se sustenta el proceso económico y sobre la que se deriva el progreso tecnológico que es la energía.

Los modelos exógenos y endógenos del crecimiento le conceden relevancia al progreso tecnológico de diferentes maneras. Su interés es medir su contribución en el crecimiento, mas no se preocupan por comprender la forma en que se concibe, lo cual debería ser imprescindible sí se supone que la evidencia empírica ha mostrado que el desarrollo tecnológico tiene una participación de gran envergadura en la economía.

Luego de la extensa preocupación y análisis de los economistas por comprender los determinantes del crecimiento económico, la teoría extiende su análisis hacia el estudio de mecanismos que integren el medio ambiente en la economía. Esto toma lugar principalmente en 1972 con la publicación de dos informes sustanciales, el de la Conferencia de Estocolmo que había sido convocado por la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), y el Informe *Los Límites del Crecimiento* del Club de Roma (Gómez y Posada, 2003). En últimas, los temas ambientales empezaron a ocupar lugar en el mundo académico, en el administrativo, en los medios de difusión y en la misma población. Incluso, instituciones reconocidas como el Fondo Monetario Internacional, el Banco Mundial y la OCDE, han desencadenado esfuerzos para mitigar la problemática ambiental pero no han sido suficientes para contrarrestar las altas tasas de extracción de recursos naturales y la emisión de residuos per cápita; es más, éstos siguen aumentando a gran escala dando un panorama poco favorable para el medio ambiente (Naredo J. M., 2001).

De cualquier manera, la extensa literatura que emergió sobre el tema cuestionó la economía y abrió camino para que el enigma ecológico fuera un asunto de interés en la comunidad académica y política. Con este problema ya identificado, el evento que puso realmente en evidencia los límites biofísicos que tienen los recursos naturales fue la denominada “crisis del petróleo” de 1973 y 1979; de ahí surgieron entonces, los primeros debates en contra del crecimiento sin límites, dando paso a que se incorporara la variable medioambiental en los modelos económicos, del cual se derivan dos posturas contrapuestas: la economía ambiental y la economía ecológica. El primer enfoque se fundamenta en la ortodoxia microeconómica y propugna por analizar la escasez de recursos mediante un procedimiento de internalización de externalidades, como lo había planteado Pigou en 1920. En esta fundamentación teórica, a los bienes ambientales se les asigna un precio, de manera que son considerados como bienes económicos. En contraste, el otro enfoque se orienta en articular la economía con la biología, la física y la ecología - sus propuestas se mostrarán en el siguiente capítulo -.

El pionero en el análisis de externalidades y de impacto sobre los individuos y el medio ambiente causado por el desarrollo de las actividades económicas, fue Pigou. Su planteamiento indicaba que la intervención del Estado era necesaria para corregir las fallas del mercado y, de ese modo, que los recursos se distribuyeran de forma más eficiente. Uno de los aspectos relevantes del pensamiento pigouviano es que hay un reconocimiento por el futuro, aduciendo que la preferencia del individuo por el presente, tiene efectos negativos porque incita al consumo del capital existente y, además, porque el desentendimiento por el futuro repercute en la explotación acelerada de los recursos naturales (Gómez y Posada, 2003, p. 147). Y si bien estuvo preocupado por el entorno ambiental y la manera eficiente de asignar los recursos, su estudio seguía bajo los lineamientos neoclásicos y continuaba omitiendo las bases esenciales para el análisis entre la relación economía y naturaleza.

Es conocido que desde los setenta la economía ambiental surgió como una disciplina para atender los problemas de contaminación y escases de recursos, sin

embargo, la discusión a nivel mundial tomó especial fuerza entre los años ochenta y noventa debido a que el deterioro era cada vez más perceptible ante la sociedad y el sistema económico. Los economistas intentaron dar respuesta y fundamentar su teoría con lo que estaba aconteciendo: agotamiento de los recursos.

De esta forma, los neoclásicos restringieron el objeto de la ciencia económica toda vez que excluyeron a los recursos naturales y energéticos del planteamiento económico, y si bien trataron de contextualizarse con el mundo contemporáneo al establecer otra rama denominada Economía Ambiental, la cual introduce factores ambientales en la modelación económica regulados por individuos racionales que responden al incentivo de los precios, esto sugiere que los recursos naturales pueden formar parte del sistema económico en la medida en que se conviertan en apropiables y valorables. Esta percepción resulta ambigua porque a un recurso como el aire, no se le debe asignar un valor de cambio porque no es transable, pero sí es esencial para la vida del ser humano (Naredo J. M., 1987).

2.4 Reflexiones

Los aportes de los fisiócratas constituyen un fundamento relevante para comprender el rol de la energía en la producción. Esta escuela tácitamente admitió que la energía era esencial en la producción económica al considerar la tierra como el factor productivo fundamental, su falencia es que no fue plasmado explícitamente ya que no comprendían que ésta era una fuente de absorción de energía solar, es decir, el concepto de fotosíntesis fue escasamente entendido (Hall y Klitgaard, 2012).

Por su parte, las escuelas clásica y neoclásica consideran desde una visión diferente a los recursos naturales y energéticos en el proceso productivo. De una parte, los clásicos no consideraron abiertamente a la energía como un factor productivo pero lo hicieron implícitamente a través de la incorporación de la tierra. Es de anotar que Smith, Malthus y Ricardo expusieron claramente las restricciones

de la tierra y las limitaciones que esto podía tener en la sociedad y la economía; para Ricardo, la tierra tenía rendimientos decrecientes. Otro caso sucedió con Marx, quien sugirió que la innovación tecnológica evitaría llegar al estado estacionario y en consecuencia, ése factor podía evitar cualquier escasez de recursos.

De otra parte, los neoclásicos redujeron el concepto de producción y dejaron de un lado el trabajo y la tierra como factores, en tanto que el primero fue abreviado en mano de obra y, el segundo, se asimiló al capital, mientras que la energía se tomó como una materia prima o un bien intermedio que se elabora y se consume en el proceso productivo. Con todo, ninguna teoría económica ofrece una representación clara sobre el rol de la energía como base fundamental del proceso económico.

Aunque a raíz de la crisis petrolera apareció extensa literatura en torno al tema ambiental, muchos economistas no aceptaron la escasez absoluta de recursos naturales, incluso, su visión se basaba en la confianza por las innovaciones técnicas y en que la sustitución de recursos impulsada por los incentivos del mercado, resolverán las cuestiones de largo plazo. Tal crisis no fue evidencia clara para que los economistas reconocieran las restricciones que tiene el entorno natural, de hecho la finitud de recursos sigue siendo un mito para muchos académicos.

Actualmente es la teoría neoclásica la que predomina en la economía bajo el marco formal de las matemáticas y bajo los supuestos que dictan las leyes del mercado. Si bien sus fundamentos teóricos son rigurosos y formalizados gracias al uso de las matemáticas y la física mecánica, han asumido una posición contraria a la que debe usarse para explicar el proceso económico, la perspectiva termodinámica que es fundamental.

Es en este contexto que académicos, particularmente de otras disciplinas, han cuestionado ampliamente el enfoque que ha afectado a millones de personas y a muchos ecosistemas del mundo, proponiendo así, una perspectiva alternativa de

la economía que la integra con áreas como la biología, la física, la ecología y la química, como se verá consecutivamente.

Capítulo 3

La energía en el proceso económico

Las sociedades antiguas han estado evolucionando en función de la mayor disponibilidad de energía y el surgimiento de nuevas técnicas y herramientas tecnológicas para convertir la energía en trabajo mecánico equivalente, hasta alcanzar las sociedades contemporáneas que son energético-intensivas. Las fuentes energéticas no sólo son indispensables en el sistema productivo, también en el desarrollo de las actividades cotidianas. De ahí que la consolidación de corrientes que integran la termodinámica, la ecología, la biología y las ciencias sociales, son trascendentales porque consideran las características de la energía como factor potenciador de la riqueza material. En este sentido, el capítulo se divide en dos secciones: la primera corresponde a una mirada sobre cómo fue el proceso de afianzamiento de la denominada economía biofísica y las dos primeras leyes de la termodinámica, asociadas con la energía; la segunda sección es sobre la energía como factor fundamental en el proceso económico, una construcción de argumentos y una revisión del marco de la economía ecológica.

3.1 La economía biofísica y las Leyes de la Termodinámica

Este trabajo, al tener como objeto mostrar que la energía es el fundamento real del proceso económico, debe considerar y analizar los principios de la termodinámica, especialmente las dos primeras leyes que son fundamentales para entender a grandes rasgos porqué la economía debe incorporar la óptica de esta parte de la física, cuyos conceptos base crean un sistema que asigna eficientemente los recursos y contempla la escasez de los recursos naturales y energéticos.

Al referirse a la energía como un factor productivo, resulta obligatorio departir sobre los aspectos básicos de las dos primeras leyes de la termodinámica, sin antes mirar los antecedentes y el contexto en el que se desenvuelve la economía.

La economía ortodoxa se estableció como una ciencia a partir del planteamiento de las matemáticas y la mecánica clásica o racional de la física, éste ha sido el soporte por varias décadas y sigue presente para explicar el proceso económico (Mallorquín, 2003). La economía se fundó en tales bases, indicando que todo insumo que entra en el proceso de producción debe salir en la misma cantidad y calidad, haciendo referencia a la primera ley de la termodinámica, la ley de conservación de la energía (Georgescu-Roegen, 1975).

De otro lado, los físicos reconocieron que el calor se mueve por sí mismo en una dirección concreta, del cuerpo más caliente al más frío. En esta ciencia se comprendieron las restricciones que implicaba basarse en las leyes de la mecánica newtoniana, de ahí que la física clásica fue evolucionando desde los inicios de 1800. Nicolás Sadi Carnot contribuyó en tal revolución dado su interés por comprender las propiedades de la materia, la energía, el trabajo y el calor, y en 1824 publicó[34] el artículo sobre la eficiencia de los motores a vapor que marcó el

[34] Ésta fue una publicación de la Fundación de la Termodinámica titulada R*eflexiones sobre la fuerza motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*, la cual describe las relaciones energéticas básicas entre el motor de Carnot, el ciclo de Carnot y la fuerza motriz (Hall y Klitgaard, 2012, pp. 226).

comienzo de la termodinámica como una ciencia moderna. Sin embargo, cuando Carnot murió su trabajo no había tenido mucho impacto y posteriormente fue James Joule quien acuñó el término termodinámica en 1849 (Hall y Klitgaard, 2012, p. 26).

Rudolf Clausius incorporó el concepto de entropía por medio de la segunda ley de la termodinámica y concedió una formulación a las dos primeras leyes de esta ciencia moderna: (1) *La energía del universo permanece constante;* (2) *La entropía del universo se mueve en todo momento hacia un máximo* (Georgescu-Roegen N., 1996, p. 183).

En este sentido, la oposición entre la mecánica y la termodinámica ocurre con la Ley de la Entropía la cual plantea que *todos los tipos de energía se transforman gradualmente en calor y el calor termina por disiparse hasta un punto en que el hombre ya no puede utilizarla* (Georgescu-Roegen N., 1975, p. 97). Lo anterior denota que la entropía es un índice de desorden de la energía, es decir, que no vuelve a su forma habitual como lo había planteado la mecánica, además ésta es una ley natural que contempla la flecha del tiempo, la irreversibilidad y la probabilidad, esta última definición fue usada por Ludwig Boltzman para la formalización de la dispersión de la energía y la explicación de la ocurrencia de varias complexiones (Gómez, 2002, p. 104).

De manera formal, la entropía fue definida por la fórmula:

(1) $Entropía = \ (Energía\ disipada)/\ (Temperatura\ Absoluta)$

Sin embargo, la fórmula consagrada en la teoría es:

(1a) $\Delta S = \Delta Q/T$

Donde ΔS es el incremento de entropía, ΔQ es el incremento del calor transferido desde el cuerpo caliente al frío y T la temperatura absoluta a la que se lleva a cabo la transferencia de calor (Georgescu-Roegen N., 1996, p. 184). La Ley de la Entropía considera los cambios cualitativos a través del tiempo, es una ley que puede asemejarse como evolutiva y seguramente por esa razón Clausius

pensó en denominarla *entropía*, dado que se refiere a una palabra griega que significa transformación o evolución (Georgescu-Roegen N. , 1996, p. 184).

A partir de entonces, el concepto de entropía empezó a expandirse y analizarse no sólo en la física, sino también en diferentes ramas del conocimiento como en la biología y la química.

3.1.1 Economía biofísica

Desde la biología Herbert Spencer (1880) argumentó que los s*istemas humanos tienen la capacidad única de detener temporalmente e incluso revertir el aumento espontáneo de la entropía por aprovechar los flujos de energía en la naturaleza* (Cleveland C. J., 1999, p. 6). Aportes que resultan fundamentales actualmente dado el incremento constante de entropía que implica pérdida de calor, de energía y mayor contaminación, en la que el ser humano está en la capacidad de evitarlo.

Sergei Podolinsky (1880) estuvo, igualmente, preocupado por la acumulación de energía no útil que genera cada actividad en el mundo, y si bien en esa época todavía no era evidente, estimó que con el paso del tiempo la dispersión de energía y en consecuencia la contaminación de la atmósfera sería inminente ante la percepción del ser humano. Aquel fue el primero en analizar explícitamente el proceso económico aplicando los principios de la termodinámica y el de sistemas abiertos de los fenómenos biológicos (Martínez-Alier, 1994). Destacaba que el trabajo útil se refería al aumento de la acumulación de la energía solar sobre la superficie terrestre, acto que las plantas no realizan porque conservan la energía o no lo transforman en trabajo mecánico, mientras que la agricultura sí podía efectuarlo (Podolinsky, 1880).

Sergei Podolinsky trató de convencer a los marxistas que la energía era un principio de valor más correcto que el trabajo (Mirowski, 1988). Este médico ucraniano expuso que los límites del crecimiento económico estaban asociados con las restricciones físicas y ecológicas, esto es, que el proceso de producción

debería estar regido por las leyes de la termodinámica (Cleveland C. J., 1999, p. 7).

Patrick Geddes, biólogo de profesión y uno de los fundadores de la planificación regional y urbana, se interesó por comprender los flujos de energía, agua y materiales que entraban en la ciudad y en el destino de los residuos (Martínez-Alier, 1995, p. 12). Fue un crítico de la economía marginalista porque el método de las ciencias no se coordinó adecuadamente con el sistema económico, su objeción lo llevó a enfocarse en la construcción de un sistema económico acorde con las ciencias naturales. Su fundamento principal reside en que la economía es un subsistema físico-químico y biológico, por consiguiente, las leyes de conservación de la materia y la energía son necesarias para comprender dicha relación (Geddes, 1884).

Wilhelm Ostwald (1907) incorporó la termodinámica en un modelo de desarrollo económico, afirmaba que la energía era la única generalización universal y que la civilización y la ciencia han avanzado gracias al dominio y control del hombre sobre las energías inanimadas, así que consideraba que las leyes de la termodinámica serían el fundamento principal de todas las ciencias (Cleveland C. J., 1999, pp. 6,7).

A inicios del siglo XX, otro de los autores más destacados en estos temas fue Frederick Sodyy (1912), premio Nobel en Química en 1921, quien no consideró límites en la academia y creía que el predicamento humano no se encontraba en el mundo físico o químico sino en las ciencias sociales, por esto se interesó especialmente en la disciplina económica, convirtiéndose en uno de sus críticos más fuertes. Se destaca de él que no sólo se quedó en objeciones sino que inició su investigación tratando de obtener un concepto físico de riqueza que podría obedecer a las leyes físicas de la conservación (Mirowski, 1988). Se interesó por analizar el rol de los recursos naturales y la energía en el proceso de producción y por aplicar las leyes de la termodinámica en la representación del sistema económico. Uno de sus principios teóricos radica en que las plantas son las capitalistas originales porque capturan energía del sol y la transforman, lo cual en

definitiva significa que para Soddy la energía es la que permite todos los procesos de la vida (Cleveland C. J., 1999).

Otro académico contemporáneo de Soddy fue Alfred Lotka (1914, 1922, 1924), un biólogo físico quien no estudió directamente cómo adoptar los principios biofísicos en el sistema económico pero estableció que los mecanismos de selección natural podrían ser explicados en términos de energía (Cleveland C. J., 1999, p. 9). Lotka fue el primero en tratar de integrar los sistemas ecológicos y económicos en términos cuantitativos, además de intentar mostrar esta integración como una dinámica no lineal que está restringida por flujos de energía. Este científico estableció el denominado *Principio de energía de Lotka*, consistente en que los sistemas sobreviven al maximizar su flujo de energía, esto significa la tasa de uso efectivo de potencia o energía (Costanza, et al., 1999).

Lotka señaló que el proceso económico es una continuación del biológico, porque en última instancia todos los seres vivos usan únicamente sus instrumentos endosomáticos, mientras que el hombre utiliza los exosomáticos o producidos por él mismo (Georgescu-Roegen N., 1996, p. 56). Posteriormente esto le permitió entender a Georgescu-Roegen, la razón de que únicamente la especie humana está sujeta a un conflicto social irreductible.

En 1918 se constituyó el grupo de Alianza Técnica que en 1921 se convirtió en el denominado grupo de los Tecnócratas, dirigido por Howard Scott pero conformado en conjunto con el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Columbia, quienes inicialmente, se enfocaron en analizar la producción y el empleo en unidades de energía para América del Norte. El principio tecnócrata estaba fundado en que la energía es el factor determinante del desarrollo de la sociedad y la economía (Cleveland C. J., 1999, p. 10).

A mediados de la segunda mitad del siglo XX aparece William Frederick Cottrell (1955) con un estudio exhaustivo sobre la representación de la energía en la economía y la sociedad. Sus observaciones y análisis plantearon que la sociedad

progresaba en la creación de nuevas tecnologías y en la mayor producción de bienes y servicios sólo si los flujos energéticos proveían mayor rendimiento. Fue el primer científico social en identificar la importancia de los retornos netos o excesos de energía, de tal modo reconoció que el proceso de Revolución Industrial y la expansión excepcional de la economía durante el siglo XIX fue gracias al excedente de las fuentes energéticas (Cleveland C. J., 1999).

Posteriormente, el geofísico M. King Hubbert aplicó sus conocimientos de la física, las matemáticas y la geología para analizar la oferta de los recursos no renovables. En 1949 predijo que la era de los combustibles fósiles llegaría hasta su punto máximo en 1960 (Cleveland C. J., 1999, p. 13). Su predicción y trabajo teórico influyó en los académicos y políticos para comprender que existía un factor crítico sobre el cual se sostiene el proceso de producción, la calidad y disponibilidad de la energía. Hubbert estaba en oposición al planteamiento del *mainstream* porque no se fundaba en los aspectos biofísicos, era un hombre impávido a la hora de criticar las fallas de la teoría económica estándar.

Muchos trabajos tenían en común el análisis de esos temas pero diferían en la forma de abordarlo y, por supuesto, obtenían resultados y alcances muy diversos. En la economía biofísica se han desarrollado gran cantidad de estudios que se distinguen por ser de corte transdisciplinar. Uno de los grandes aportes fue ilustrado por Howard T. Odum (1971) en su libro *Environment, Power and Society*, en el cual desarrolló una integración completa de sistemas con el flujo de energía como factor integrador. Esta obra se publicó al tiempo que el reconocido trabajo de Georgescu-Roegen, de hecho tenían intereses académicos en común, con la diferencia en que Odum abarcaba temas más amplios porque incluía sistemas físicos y químicos, sistemas biológicos y ecológicos y sistemas económicos y sociales.

El planteamiento de Odum se apoyó en la teoría de selección natural de Darwin y utilizó la hipótesis de selección natural de Lotka (1922) para desarrollarlo como un criterio evolucionista de los sistemas (Costanza, et al., 1999, p. 66, 67). Howard,

basado en Lotka y Darwin, consolidó el principio del poder máximo el cual establece que *la maximización del trabajo útil obtenido desde la conversión de la energía es un criterio de selección natural* (Cleveland C. J., 1999, p. 14). Odum aduce que los seres humanos están sujetos al igual que otros sistemas, ya sean ecológicos y demás, a operar bajo la eficiencia en el uso de la energía conforme los ecosistemas y las economías.

En síntesis, dos de las contribuciones más importantes de Odum hacen referencia a que el progreso de las sociedades estaba en función de la calidad de la energía y en los flujos contracorrientes del dinero y la economía (Cleveland C. J., 1999, p. 15). Estos aportes inspiraron, a su vez, a otra generación de académicos como Hannon (1975), Ayres (1978), Costanza (1980), entre otros, a analizar la ecología como una ciencia de sistemas e integrarla con la economía.

De un lado, el físico Robert Ayres (1978) estaba interesado en integrar los fundamentos biofísicos con el proceso económico, sus investigaciones se basaron en un modelo de balance materia-energía. Ayres se oponía a la representación de la producción como un sistema cíclico y cerrado y su objetivo fue analizar los principios de la entropía asociados con la segunda ley de la termodinámica para considerar la calidad de los recursos naturales en términos físicos (Cleveland C. J., 1999, p. 18).

De otro lado, Costanza (1980,1981) dio un soporte empírico a las ideas planteadas por Howard T. Odum, de tal forma que analizó y demostró que existía una relación entre la energía directa e indirecta usada para producir bienes y servicios en Estados Unidos y que el valor del dólar estaba ligado a las transacciones de productos en el mercado. Esta teoría del valor de la energía incorporada por Odum y formalizada por Costanza, fue criticada por algunos economistas como Daly (1981).

Herman E. Daly (1977) fue otro académico muy influyente en estos temas, y al igual que Soddy (1926), difería de la teoría económica tradicional porque el sistema se centraba en los flujos monetarios. Este ecologista enfatizó en que el sistema

económico no es circular y está ligado a los flujos físicos de la materia y la energía, replicando así el planteamiento de la teoría del crecimiento que supone flujos circulares de intercambio de dinero (Cleveland C. J., 1999, p. 20).

Daly, además, objetaba la confianza que tenían los economistas convencionales en los avances tecnológicos para superar cualquier límite biofísico y de escasez que se presentara, para él esta creencia prescindía de los principios termodinámicos que deberían regir y aplicarse en el proceso productivo. En contraste, su perspectiva se fundamentó en dar nueva forma a la economía como una ciencia de la vida, siguiendo el umbral de la ecología (Costanza, et al., 1999, p. 69).

Daly (1977) ahondó en la economía de estado estable, soportado en que la tierra es fija o no crece y, en efecto, no puede presentarse un continuo crecimiento de la producción, es decir, la economía debe permanecer en un estado estacionario y la población mantenerse constante. Esta visión revela una solución ideal porque implicaría hacer uso racional de la materia y la energía, sin embargo, él mismo aceptó que éste es un hecho poco palpable porque la sociedad está orientada en alcanzar mayores niveles de riqueza material y no estaría dispuesta a realizar ningún cambio que le implique sacrificar su nivel de vida.

Hasta ahora se ha visto cómo desde el siglo XIX emergieron numerosos estudios que tratan de entretejer lazos entre la economía y las ciencias naturales, los aquí enunciados están enmarcados principalmente en un enfoque heterodoxo del que también se pueden distinguir dos perspectivas, de un lado, están los exponentes de la teoría del valor energía, llamados comúnmente energicistas, como Costanza (1980) y Odum (1971) y del otro, los economistas ecológicos con su precursor Nicholas Georgescu, quien rechazó esa teoría del valor porque la materia/energía es tratada como una entidad conservada, es decir, la materia es despojada de las propiedades multiformes específicas que son consustanciales en el proceso de producción (Mirowski, 1988).

Georgescu, economista rumano, refutaba el hecho de que los científicos se preocuparan en exceso por la energía y no comprendieran las restricciones de la materia, en lo que tiene razón porque hay escasez de ciertas sustancias materiales y la energía proviene de materia como los recursos naturales, por lo que su agotamiento también es alarmante.

Este rumano rebatió a los energicistas, Odum y Costanza, por contemplar de forma implícita o explícita que el reciclaje puede hacerse completamente si hay suficiente energía disponible (Carpintero, 2006). Su rechazo se afianzó con la proposición de una cuarta Ley de la Termodinámica, la cual predica que la materia es importante al igual que la energía. Es decir, el principio de entropía se aplica a estos dos términos porque siempre están juntos, nunca se puede manejar la energía sin un receptor material, palanca de materiales o un material transmisor (Cleveland y Ruth, 1997). Esto en palabras de Georgescu-Roegen (1996, p. 198) significa que *la degradación del universo es incluso más extensa que la contemplada por la termodinámica clásica: abarca no solamente la energía sino también las estructuras materiales*. De cualquier manera, hasta sus más fieles seguidores objetaron ese planteamiento ya que lo consideraban innecesario al haberse esbozado tácitamente a través de la segunda Ley de la Termodinámica.

Los anteriores antecedentes han indicado cómo a partir de la introducción de La Ley de la Entropía en el siglo XIX, el planteamiento tácito en el cual los insumos entrantes al proceso productivo no están sujetos a cambios irreversibles, se ha cuestionado particularmente por académicos de ramas del conocimiento como la física, la biología y la química, pues éstas sí pusieron, en el eje central del análisis, las alteraciones cualitativas que sufre la materia y la energía, en el que ni siquiera los avances tecnológicos podrían revertir.

De ese modo, los aportes precedentes sobre el estudio de la economía biofísica han sido fundamentales para establecer las bases de lo que hoy se denomina economía ecológica, fundada por Nicholas Georgescu-Roegen, quien incorporó un análisis riguroso sobre la relación entre energía, Ley de la Entropía y el proceso económico.

3.2 La energía como factor fundamental en el proceso económico

Las teorías económicas que rigen actualmente se establecieron hace un par de siglos en un contexto de abundancia de recursos naturales y bajo los principios mecanicistas de la física. Y si bien la ciencia física evolucionó para tratar de comprender la dinámica de la energía que no se lograba entender con los conceptos clásicos, la economía continúa bajo esos mismos preceptos. El mundo y la sociedad moderna ha trasegado desde la prehistoria, en ese mismo ritmo se han desarrollado continuas teorías económicas acordes con el contexto de cada época con el fin de explicar la coyuntura social y económica. El problema que se ha presentado desde finales del siglo XX, es que los modelos económicos no han logrado aplicar de manera efectiva el trilema que plantea el desarrollo sostenible para así anteponerse a los límites biológicos de la tierra.

Esta falencia ha sido atendida y comprendida desde tiempo atrás como se expuso en la sección anterior. En el siglo XX, fue el matemático y doctor en Economía, Nicholas Georgescu-Roegen, quien lo ilustró en su distinguido trabajo: *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Para este rumano el mecanismo de mercado no tiene la virtud de proteger a la humanidad de las crisis económicas debido a que no tiene en cuenta las generaciones futuras, es decir, no asigna adecuadamente los recursos, su propuesta, es entonces, reeducar a los seres humanos para que sean altruistas y consideren las generaciones que vendrán, de tal forma que no haya un consumo excesivo de recursos naturales (Georgescu-Roegen N., 1975).

Georgescu afianzó una visión diferente de la economía fundada en los principios físicos, químicos y biológicos de la existencia humana, en donde los recursos naturales deben incorporarse al proceso económico como factores fundamentales, pretendiendo una nueva manera de pensar las relaciones de la humanidad con la naturaleza, en el cual el hombre se percate de las limitaciones que impone la naturaleza por medio de las herramientas de la biología y la

termodinámica. Su trabajo fue una gran contribución para la consolidación de la denominada Economía Ecológica, sin desconocer los anteriores aportes de Podolinsky (1883), Soddy (1921) y Odum (1971), entre otros, quienes se interesaron por fundamentar la teoría económica con base en la física y la ecología.

Para concluir con el tejido que existe entre la energía y el proceso económico, es necesario comprender este último concepto. Según Georgescu-Roegen (1996, p. 64), el proceso económico consiste en:

> *una transformación de baja en alta entropía, es decir, en desechos, y, dado que esa transformación es irrevocable, los recursos naturales han de constituir necesariamente parte de la noción de valor económico; y, puesto que el proceso económico no es automático sino deseado, los servicios de todos los agentes, humanos o materiales, pertenecen también a la misma faceta de esa noción.*

El ecologista definió el proceso económico en términos cualitativos, le concedió importancia al flujo de energía y a los recursos naturales como parte del valor económico destacando, además, que es un proceso unidireccional e irrevocable, que tiene un límite espacial y temporal. Esta concepción antepone al planteado por la economía tradicional que lo ha entendido en términos físico cuantitativos, midiendo el volumen o peso de los materiales e ignorando conceptos tales como tensión, calor, entre otros, que son variables cualitativas (Georgescu-Roegen N., 1996, p. 162).

El punto principal es, entonces, comprender que el proceso económico es un proceso de trabajo sostenido por un flujo de materia y energía de baja entropía del medio ambiente que entran al sistema económico y a través de éste, son transformados en producción y consumo, causando mayor entropía, es decir, materia y energía no disponibles (Cleveland y Ruth, 1997, p. 205). De aquí que para Georgescu-Roegen (1996), el proceso económico es eminentemente entrópico, desecho irrevocable o contaminación.

De lo anterior, se deriva otro punto fundamental y es que el ecosistema global es un sistema materialmente cerrado en el que está inmersa la economía humana como un subsistema abierto y está sujeto a las leyes de la naturaleza y los límites biofísicos que ésta tiene (Cleveland et al., (1997), Cleveland (1999)).

Es por esto que surge la importancia de integrar otras ciencias naturales de forma adecuada con el sistema económico, tales como la termodinámica y su respectivo concepto de entropía. Incluir la termodinámica implica concebir a la producción como un proceso irreversible y no circular, en donde la materia y la energía se mueven en una dirección concreta e implican un cambio cualitativo. Esta es la lección de la termodinámica que es *en el fondo una física con valor económico* y de su asociada Ley de la entropía que *es por naturaleza la más económica de todas las leyes naturales* (Georgescu-Roegen N., 1975, p. 98).

Esta parte de la física moderna con su definición de entropía constituyen la raíz de la escasez económica debido a que restringen el uso de la energía, subrayan la existencia de la contaminación y los problemas asociados con el continuo crecimiento de la población; sin esta segunda Ley de la Termodinámica, tácitamente, se estaría diciendo que no habría depreciación de las cosas materiales ni escasez de energía (Georgescu-Roegen N., 1975).

Lo anterior merece contemplarse debido a que todo tipo de producción material implica un gasto de energía: el transporte de la materia prima y los bienes finales, así como el consumo energético de la maquinaria y los trabajadores, entre otros. Entonces el crecimiento y desarrollo de las actividades económicas está limitado por la disponibilidad de la energía que proviene de los recursos naturales, motivo por el cual, las sociedades y actividades productivas que son energético-intensivas en recursos no renovables, deben considerar dichas restricciones y buscar otros panoramas de utilización de recursos para satisfacer sus necesidades energéticas, antes que la era del petróleo barato culmine.

Dejando de lado lo que denota proceso económico y cómo su operación implica alteraciones en la materia y la energía, es importante, ahora, precisar y

analizar lo que se considera como factores de producción y la relación complementaria que existe entre éstos.

Alam (2006) tácitamente plantea que la energía y la fuerza humana son factores homogéneos. Esto indica que merced de la energía inorgánica, la fuerza laboral del hombre ha dejado de realizar una de sus funciones: fuerza motriz que era esencial para proveer energía, a través de sus músculos, en la producción de las actividades económicas. El trabajo entonces, ha estado ejecutando una función de control, direccionando los flujos de energía con o sin herramientas. Es por esto que puede decirse, que más allá de que el capital sustituya al trabajo, es la energía el factor que puede suplantarlo.

Inherentemente, es necesario puntualizar que el factor trabajo ha cambiado con el crecimiento y se ha liberado para otros usos. Esto también aplica para el factor tierra, porque al encontrar mayor oferta de energía en cantidad y calidad, permite que el uso del suelo y en general, de los recursos naturales, se emplee en diversas actividades y soporte mayor demanda de la población. Esto debe dar a entender finalmente, que gracias a la energía que se incorpora en la economía, el trabajo y la tierra se liberan para otros usos. Es así como esta tesis propone que los recursos naturales y energéticos son la base, permiten producir y reproducir fuerza de trabajo y capital manufacturado, los cuales no tendrían forma de operar sin la energía. Tampoco se puede desconocer la labor que cumple el capital pues es un agente transformador de los elementos de flujo, su papel no es sólo ahorrar trabajo sino también aumentar la mayor energía física del hombre.

Esta disertación acentúa que *el equipo de capital físico no genera riqueza en sí mismo, más bien era el medio para utilizar los nuevos y grandes flujos de energía a través de la sociedad* (Hall y Klitgaard, 2012, p. 6). Esta tesis distingue que tanto el trabajo y el capital actúan como factores de soporte para extraer, convertir, direccionar y amplificar la energía para producir bienes y servicios. Como expone Alam (2006, p. 18), la magnitud de los flujos de energía en una economía depende de un factor endógeno, la tasa a la cual la economía puede acumular capital para extraer, convertir y aprovechar la energía. La acumulación de capital incorpora a la

energía en el proceso económico y éste último a su vez, retroalimenta y genera mayor acumulación de capital físico. Es decir, todos estos factores desempeñan una función, en el que debe ser eminente el rol de los recursos naturales porque sin éstos, el trabajo y el capital no podrían desempeñar su labor, es decir, los factores de producción son complementarios y no sustitutos.

Kümmel (2011) también considera que todos los factores productivos actúan de manera interdependiente. Para este físico, en ausencia de la energía, el capital no puede desempeñar sus operaciones porque para activar las máquinas es necesario hacer uso de la energía, asimismo, para que el *stock* de capital sea productivo, éste debe ser asignado, organizado y supervisado por el trabajo humano. En este sentido, está reconociendo el estrecho lazo que se entreteje entre los *inputs* de producción.

La economía real requiere de materia y energía de la naturaleza para realizar su producción, de ahí es esencial que esta disciplina sea contemplada como un subsistema que hace parte del sistema global cerrado mayor, de tal forma que entienda la relación complementaria existente entre los factores de producción y, sobre todo, su base fundamental que es la energía. A partir de lo anterior, es de carácter preeminente referirse a la economía como un sistema de energía, considerando el cambio cualitativo que se genera en el proceso económico cuando ingresan los insumos de energía y materiales en forma de baja entropía y que luego emanan en forma de bienes o de alta entropía (desechos).

El fundamento de la economía debe analizar el funcionamiento de las existencias y de los flujos de materia y energía, para lo cual es necesario que integre otras ciencias naturales sin perder su objeto social. Esto no indica otra cosa que replantear la forma de representar el proceso de producción, y aunque el uso de las matemáticas no es equívoco, sí lo es su exceso para indicar aspectos tan individuales y particulares como las preferencias y las decisiones de los agentes. Es decir, el análisis cualitativo también tiene la prerrogativa de formar estudios serios y rigurosos que evidencien elementos ilustrativos de quienes participan en el sistema económico y más aún, cuando se lo que se propone es analizar la

economía como un sistema energético en el que tácitamente ocurren cambios cualitativos.

La economía no puede seguir examinándose como un sistema aislado, ésta debe interactuar con su entorno y tomar modelos que se ajusten con los problemas de agotamiento, como por ejemplo, incluyendo la dinámica de los sistemas, principalmente para considerar los límites biofísicos que tienen los recursos naturales y energéticos. Una vez se admita que existen restricciones físicas y que los insumos de la naturaleza son escasos, entonces se debe tener en cuenta la capacidad de regeneración de los ecosistemas para absorber los desechos o desperdicios. Y cuando esto se haya entendido por los economistas, se está dando un paso para estudiar a la economía como un subsistema abierto que está inmerso en un sistema global más grande que es materialmente cerrado, es decir, no creciente.

Lo anterior es sustancial para evitar mayor contaminación ambiental debido a que los desperdicios son arrojados al entorno natural sin entender que no es posible enviarlos más allá en el espacio. Al respecto conviene decir que los dos tipos de residuos generados en cualquier proceso económico y que quedan en el sistema global son el calor disipado y los residuos materiales, los cuales mediante reciclaje se podrían usar parcialmente. El problema radica en que si bien, parte de los desechos de materia podrían reutilizarse, esto no se puede hacer de forma absoluta; ahora, pensar en el reciclaje de la energía resulta un proceso complejo o imposible según las leyes de la naturaleza. Como lo indica Daly (1997), un trozo de carbón no puede quemarse dos veces, cuando se quemó una vez ya se obtuvo cenizas, CO_2 y calor de desperdicio, así como calor útil. De aquí que sea necesario comprender la Ley de la Entropía porque indica la restricción del uso de la materia y el límite técnico de reciclar la energía.

Es necesario hacer entender a la economía y al mundo entero que la energía de baja entropía es elemental para desarrollar cualquier proceso económico. Por este motivo, se deben considerar aspectos termodinámicos y empezar a pensar en que la economía humana es totalmente dependiente de los servicios que ofrece la

naturaleza y que cualquier actividad del hombre requiere del uso de energía en sus diferentes formas, ya sea a través de alimento, de combustibles fósiles, de electricidad, etcétera.

Sí los economistas aceptaran trabajar mancomunadamente con otras áreas del conocimiento, su planteamiento trataría perspectivas acordes con las situaciones del entorno. Con las bases conceptuales de, por ejemplo, la física dinámica se entendería la importancia de las leyes de la termodinámica, y al haber comprendido esto, se estaría reconociendo que en efecto nada pasa en el mundo sin la conversión de energía y la generación de entropía.

Ahora bien, de manera breve se mostrará los estudios que han propuesto entretejer un lazo entre la energía y la economía. Su fundamento principal es que el progreso social y económico se genera a partir de la energía, reconociendo que las políticas económicas deben estar determinadas sobre el uso y producción de éste recurso.

Capítulo 4

Estado actual del debate en la frontera del conocimiento de la economía

La relación entre la economía y la energía es un tema ampliamente debatido en la academia a nivel mundial. La energía proveniente de diferentes fuentes, se establece como un determinante y a la vez, como un limitante al desarrollo de los procesos productivos, esto ha motivado a que desde diferentes áreas del conocimiento se muestre la correlación existente entre estos dos aspectos. Las metodologías abordadas se plantean desde visiones que vinculan a la energía como determinante de la evolución cultural, hasta trabajos empíricos que incluyen a la energía como un factor productivo, junto con el capital y el trabajo. Este capítulo constituye un estado del arte en esta frontera del conocimiento.

4.1 Energía y sociedad

La importancia de los recursos energéticos no sólo yace en ser una fuente que permite la realización de las actividades económicas, sino también en ser un indicador de evolución cultural y social, hecho que se evidenció en capítulos anteriores con la descripción histórica sobre la evolución y uso de las diferentes formas de energía. Por este motivo, es importante destacar el trabajo del antropólogo Leslie White (1943) cuya tesis principal es que la civilización ha

avanzado exponencialmente gracias al aprovechamiento del combustible como una fuente de mayor energía per cápita por unidad de tiempo. La conclusión de White es que el uso de la energía es el único determinante de la evolución cultural.

Asimismo, el texto de Rosa et. al (1988) introduce una visión de la energía mucho más allá de lo que conocemos desde la física, ellos desarrollan el argumento sobre cómo la energía ha impactado en el desarrollo de la sociedad. En su documento contempla un análisis macro y microsociológico. A nivel macro, enfatiza en la importancia de la energía para el desarrollo de las sociedades y destaca la fuerte relación entre el uso de la energía y los excesos de crecimiento económico. Para los autores, la energía es un factor fundamental del crecimiento económico, este último a su vez, es elemental para el bienestar de la población. En el análisis microsociológico, se entrelazan dos aspectos: el consumo personal de energía y el nivel de vida del hogar o la sociedad, en donde es este último el factor que determina el consumo de energía de los hogares. De Ross et al. (1988), se puede concluir tácitamente que a mayores niveles de vida en una sociedad, se necesita de más consumo energético.

El trabajo de Greenberg (1990) tal como los mostrados anteriormente, hace alusión al papel de la energía en la sociedad. Para Greenberg, el descubrimiento de diferentes formas de energía a través de la fuerza humana, animal y de las máquinas, valida la premisa de la conexión y la dependencia mutua que existe entre el hombre y la energía. Es así como sostiene que el comienzo y uso del aprovechamiento de la energía no sólo ha marcado un hito en la historia de la industrialización, sino un cambio importante en la historia de la humanidad.

En ese sentido, Wrigley (2010) explica cómo la disponibilidad y uso de recursos renovables como no renovables, constituyen una base fundamental para las economías orgánicas y luego para las economías de origen inorgánico. Para Wrigley, la energía retroalimenta positivamente las actividades económicas desde la agricultura, el transporte, la manufactura y muestra a través de un recorrido histórico de Inglaterra, cómo fue el desarrollo de la sociedad inglesa en función de

las diferentes fuentes energéticas. Wrigley expuso a lo largo de su libro *Energy and the English Industrial Revolution* (2010) que la energía puede ser un medidor equivalente del ingreso. Esta hipótesis se basa en el fundamento de que si hay una máxima disponibilidad de energía dada por una parcela de tierra, esto implicaría una asignación y distribución entre una población determinada; en última instancia la energía mide el nivel de producción y de ingresos.

A partir de lo anterior se puede decir que en la relación entre energía y sociedad, se encuentran planteamientos que convergen hacia un mismo enfoque: la energía puede medir la diferencia entre la sociedad primitiva y civilizada, tradicional y moderna, no desarrollada y desarrollada. Es decir, la disponibilidad y accesibilidad energética, sin desconocer la función de las innovaciones tecnológicas, ha trascendido en el nivel de vida de la sociedad y el nivel de producción económica.

4.2 La energía como factor fundamental de producción y como determinante de la riqueza

Con respecto a los trabajos que consideran explícitamente la energía como un factor de producción, está el elaborado por Kümmel (1982), quien analiza el impacto de la energía en el crecimiento de la productividad de Estados Unidos y Alemania, en el período comprendido entre 1960 y 1978 por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales propuestas para la descripción de un sistema industrial en función del capital, el trabajo y la energía. Para este autor, dichos factores de producción son dependientes entre sí y dirigen el crecimiento industrial y el de la economía en general. Los resultados de su trabajo muestran que, empírica y teóricamente, los patrones de crecimiento de la producción son similares y que tanto el capital como la energía en ambos países han estado dirigiendo el crecimiento económico.

Kümmel et al. (1985) enfatizan en que la energía es un factor de producción tan fundamental como lo es el capital y el trabajo. Ellos calculan las elasticidades de los factores de producción de Estados Unidos y Alemania por medio de la función LINEX porque consideran es la más adecuada para describir y comprender el crecimiento económico y las recesiones que se evidenciaron entre 1960 y 1976,[35] la conclusión relevante es que existe una fuerte relación entre el progreso técnico y el uso de la energía en las economías industriales avanzadas.

Cleveland et al. (1984) se focalizan en mostrar la macroeconomía desde la perspectiva biofísica, basados en la producción de bienes y teniendo en cuenta las restricciones físicas. Ellos desarrollan empíricamente un análisis para entender la relación entre el uso nacional de energía y la actividad económica en Estados Unidos con series de tiempo de 1900 a 1980.[36] Similarmente el trabajo de Cleveland (1987) analiza el proceso económico desde la perspectiva biofísica apoyado en los principios ecológicos y termodinámicos que propone la economía ecológica. Uno de los aspectos esenciales de su trabajo es comprender las leyes físicas que gobiernan la energía y las transformaciones de la materia porque forman las bases del proceso de producción. El segundo aspecto al que alude en su estudio es sobre la interdependencia que existe entre los factores capital, trabajo y energía.

Y es que la energía en sus diferentes formas ha sido un factor trascendental en el desarrollo de la industria y la economía. En este sentido, Beaudreau (1995) manifiesta que la energía en general y el poder eléctrico en particular, son pieza clave para el mejoramiento de la productividad. Este autor para efectos de mostrar su hipótesis toma la función Cobb-Douglas a la cual le agrega la potencia eléctrica (EP), resultando en la denominada función KLEP (Capital, Trabajo, Energía Eléctrica). Los resultados de su análisis muestran efectivamente que el consumo

[35] Para el total de la economía alemana, los autores usaron las series de tiempo 1960-1981. Para el sector industrial de Estados Unidos se analizó el período 1960-1978; en el sector manufacturero de Alemania se calculó el período 1960-1981.
[36] El análisis se realizó para 87 sectores de la economía de Estados Unidos.

de energía eléctrica es un determinante de la actividad industrial puesto que representa 79% del crecimiento de la manufactura en Estados Unidos.

Asimismo, Rosenberg (1998) canalizó su investigación hacia el desempeño de la electricidad en el desarrollo industrial del siglo XX en Estados Unidos. Según él, la energía eléctrica fue considerada como un invento clave en la segunda fase de la Revolución Industrial, porque ha redefinido las oportunidades tecnológicas a las que tiene acceso la sociedad y las economías industriales, en la medida que permitió el uso de maquinaria y la tecnología de producción de masas. Concluye que la electricidad se ha convertido en la forma de energía preferida en la sociedad y la economía.

En la misma línea, Toman y Jemelkova (2003) expresan que la disponibilidad de energía es un factor esencial que permite el desarrollo económico. De acuerdo a estos autores hay varios canales a través de los cuales el incremento de la disponibilidad de energía afecta el desarrollo económico: la reasignación de tiempo en el hogar gracias a la provisión de energía, mejor educación, mayores ingresos y mayor especialización de las funciones económicas; las economías de escala con mayor provisión de energía de tipo industrial; la mayor flexibilidad en la asignación del tiempo entre el día y la noche; aumento de la productividad de las actividades de educación; los bajos costos de transporte y de comunicación, mayor tamaño del mercado y acceso a la información; los beneficios relacionados con la salud: reduce la exposición al humo, agua más limpia, refrigeración de los alimentos. Este trabajo en síntesis, le atribuye a la energía múltiples beneficios que se transmiten a la sociedad en general.

Desde otra perspectiva más formalizada, estudios como el de Kümmel, Henn y Lindenberger (2002) han tratado de cuantificar los impactos económicos de la energía y la creatividad para los tres mayores países industriales (Alemania, Estados Unidos y Japón). Su estudio se basa en la aplicación de una función de producción LINEX y los resultados muestran residuales mucho más pequeños y

elasticidades de producción de energía mucho más altas que en la teoría neoclásica.

Pokrovski (2003) argumenta que la energía es un factor vital en el proceso económico y que debe considerarse no sólo como un insumo intermedio que contribuye al valor de la producción por agregar su costo al precio, sino también como un factor creador de valor junto con los factores tradicionales capital y trabajo. El trabajo de Pokrovski (2003) es una buena representación empírica y conceptual sobre el rol de la energía en el proceso productivo.

Stern y Cleveland (2004) pretenden mostrar la importancia de la energía en la producción desde la perspectiva física dado que la teoría económica tradicional ha omitido el papel que desempeñan los recursos naturales y energéticos en el crecimiento económico. Estos autores tienen como premisa *que profundizar en el conocimiento del papel de la energía en el crecimiento económico no se puede lograr sin primero entender el papel de la energía en la producción* (Stern y Cleveland, 2004, p. 3). Según estos autores la evidencia conceptual y empírica indica que el uso de energía y la producción están estrechamente vinculados con la disponibilidad de fuentes energéticas que, simultáneamente, impulsan el crecimiento económico. Recientemente, Stern (2010, 2011, 2012) destacó que la disponibilidad de energía ha sido trascendental para el desarrollo de las actividades económicas y sociales.

Alam (2006) considera que el uso de la energía es una fuente importante del crecimiento material. En su trabajo expone las propiedades del sistema económico en el que la energía debe tratarse como otro factor de producción junto con el trabajo, el capital y la tecnología, ya que todos permiten la realización de las actividades económicas; añade que en el marco neoclásico, la ausencia de la energía hace difícil definir el trabajo y el capital. Su estudio conceptual hace evidente el rol activo de la energía en el proceso económico.

Ayres, Turton, y Casten (2007) argumentan que es necesario replantear la visión de la economía tradicional porque la energía no se considera como una variable relevante en el crecimiento de la producción. Uno de sus objetivos es estudiar el papel de la energía en el desarrollo económico de Estados Unidos y Japón desde 1900 a 1998. Sus resultados muestran que el crecimiento de estas economías es explicado significativamente al incorporar la energía como un factor productivo. Otro de sus objetivos consiste en analizar cómo reducir los gases de efecto invernadero, al que aducen que una regulación mejorada o al contrario la desregulación del sector eléctrico eliminaría las barreras de la competencia y permitiría mayor eficiencia en costos, principalmente en las plantas de generación eléctrica.

En este caso, un análisis conceptual y empírico es un buen argumento para considerar la energía como otro factor productivo junto con los tradicionales. Hall et al. (2001) en su metodología empírica combinan las variables: energía, capital, trabajo y creatividad[37] con los datos de Alemania, Estados Unidos y Japón. Su metodología les permitió eliminar el residual que la teoría neoclásica no fue capaz de explicar; su análisis exalta que la energía es un factor significativo debido a que es generador de riqueza.

Es necesario destacar que a partir de la aparición del trabajo de Georgescu-Roegen en 1973, emergió un número creciente de estudios usando metodologías diversas que llegaban a una conclusión coincidente y es que la energía no sólo debe integrarse como un factor elemental en el proceso de producción, sino que lo conciben como el principal determinante del crecimiento económico. Esto en otras palabras hace referencia a que *en todos los casos un análisis biofísico muestra que es la energía la que hace el trabajo actual de convertir las materias primas en bienes y servicios útiles. Por lo tanto, aunque estamos de acuerdo que muchos*

[37] Creatividad hace alusión a la contribución humana en la evolución económica que se efectúa por máquinas, tales contribuciones pueden ser las innovaciones, las ideas, los inventos, las decisiones (Hall, et al., 2001, p. 668).

factores contribuyen a la producción de la riqueza, el elemento crítico es y siempre ha sido la energía (Hall y Klitgaard, 2012, p. 129).

4.3 La exergía y su relación con el proceso de producción

En este perfil investigativo también se ha optado por incorporar el concepto de exergía, para referirse a la fracción de la energía útil que es convertida realmente en trabajo efectivo y, es una medida de la utilidad o calidad potencial de la energía para producir el cambio. El trabajo de Dincer (2002) propone utilizar el término de exergía como una herramienta eficiente para analizar el impacto del uso de los recursos naturales y energéticos en el medio ambiente y para que así permita establecer políticas gubernamentales que minimicen o eliminen tal impacto y sea posible alcanzar el desarrollo sostenible (Dincer, 2002).

Bajo ese mismo enfoque, Ayres y Warr (2005) buscan explicar la importancia de la exergía en el crecimiento económico. Ellos utilizaron una función LINEX que tiene como atributo mostrar una relación sustitución-complemento entre los factores productivos. Este planteamiento incluye la energía útil (exergía) como un tercer factor junto con el capital y el trabajo, permitiéndole endogenizar el progreso tecnológico. El trabajo de Ayres y Warr (2005) tiene una perspectiva diferente que desmitifica la concepción de la teoría neoclásica, sus argumentos son contundentes para aceptar que la energía útil (exergía) es un factor fundamental en el proceso de producción.

De otro lado, el análisis del costo ecológico ha estado fundado en las medidas de energía y exergía. Al respecto, se revisaron dos estudios: el de Szargut (2002) y el de Sciubba (2004). El primero es una muestra teórica para determinar la exergía de recursos naturales no renovables y determinar una tasa impositiva pro-

ecológica que desincentive el consumo de productos cargados con recursos no renovables, pero también puede funcionar como estímulo para el uso de nuevas tecnologías basadas en recursos renovables. El segundo, ofrece una mirada amplia y teórica sobre *exergoeconomics* que la define como una nueva técnica que sirve como instrumento de optimización. Inicialmente, él define y explica una visión termo-económica en el que supone que la exergía es la única base racional para construir una función de costos. Lo que evidencia en su fundamentación teórica es una técnica base para el procedimiento contable del costo exergético.

Recientemente, con un estudio más aplicado para tres grandes economías mundiales, Mei et al. (2013) tuvieron como propósito hallar las cantidades de energía útil que se incorporan en los productos manufacturados de las economías de Estados Unidos, China y Japón. A través de una técnica de descomposición y con datos para el año 2009, encuentran que las pérdidas de energía fueron de aproximadamente 15,25 GJ por billones de dólares. Los resultados también indicaron que según el flujo de exergía, materializado entre los productos manufacturados entre los tres países, fue Estados Unidos quien obtuvo un superávit de consumo de energía, mientras que los otros dos países mostraron un déficit.

El concepto exergético revisado en los diferentes estudios no es eminentemente físico, éste puede estar asociado con la ecología y la economía. Además se encuentra que implícita o explícitamente, los estudios concuerdan en que la exergía puede servir como instrumento de política energética, económica y ambiental.

4.4 Causalidad entre la energía y el crecimiento económico

Otro enfoque investigativo sobre la energía y la economía, se desarrolló para definir la relación causal entre consumo energético y crecimiento económico. De

acuerdo a estos estudios, la dirección de la relación causal entre consumo de energía y crecimiento económico asume cuatro formas: (1) hipótesis de neutralidad, en la que no hay causalidad entre el consumo de energía y el crecimiento económico; (2) causalidad uni-direccional (hipótesis de conservación) que va desde el PIB hasta el consumo de energía, el cual implica que las políticas de conservación de la energía pueden ser aplicadas con poco o ningún efecto adverso en el crecimiento económico; (3) causalidad uni-direccional (hipótesis de crecimiento) el cual se entiende desde el consumo de energía hacia el crecimiento económico; en este caso se dice que las políticas de conservación de la energía pueden tener efectos negativos en la economía, mientras que el incremento en el consumo de energía puede contribuir al crecimiento económico; (4) causalidad bi-direccional (hipótesis de retroalimentación) entre el consumo de la energía y el PIB; en este sentido se argumenta que cualquier política de conservación energética afectará negativamente el crecimiento de la economía, mientras que un incremento en la producción elevará el nivel de consumo de energía. Los estudios revisados contemplan estas hipótesis para el análisis, algunos de éstos son los desarrollados por Cleveland, Kaufmann y Stern (2000), Warr y Ayres (2010), Belke, Dobnik y Dreger (2011), entre otros.

A nivel latinoamericano, las investigaciones son escasas. Una de ellas ha sido llevada a cabo por Chang & Soruco (2011) en la que se realiza un estudio del consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones de dióxido de carbono en veinte países de América Latina y el Caribe; a través de un modelo de corrección de errores, se encuentra que para países como Honduras y Paraguay, la relación va desde el consumo de energía al PIB y en Colombia, la relación entre PIB y energía es bi-direccional. Con respecto a las emisiones de dióxido de carbono con el crecimiento económico, se encuentra una estrecha relación para todos los países, excepto para El Salvador y Venezuela. En su metodología también se aplica el test de causalidad de Granger para otro grupo de países y sus resultados muestran que en Brasil, Perú y Uruguay, el consumo de energía causa el crecimiento económico.

Otra investigación relacionada fue realizada por Barreto & Campo (2012), en la que se evalúa la relación de largo plazo entre el consumo de energía y el PIB para algunos países de América Latina durante 1980-2009. Finalmente, a nivel suramericano encontramos el estudio realizado por Apergis & Payne (2010) en el que se examina la relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico para nueve países de Sur América[38] en el período 1980-2005.

4.5 Los recursos energéticos como factores de producción en Colombia

Los anteriores precedentes de la economía desde una óptica heterodoxa, han sido fundamentales e influyentes en algunos académicos de las ciencias naturales y sociales en Colombia. Uno de ellos es Luis Jair Gómez quien con sus trabajos (2002, 2003, 2007), ha asumido una posición crítica frente a la economía convencional. Y no sólo ha sido un fuerte opositor sino que ha hecho aportes fundamentales en la Economía Ecológica, en su libro *Una introducción a la ecología global*, referencia conceptos básicos de ecología y energía y concede una explicación de la economía como un sistema energético. Gómez ha mostrado fundamentadas reflexiones teóricas sobre la relevancia de comprender a los recursos naturales y energéticos como un factor más en el proceso económico.

Otra referencia en Colombia sobre estos aspectos es Catalina Granda, (2006, 2007), quien efectuó un adecuado análisis sobre las condiciones técnicas para el crecimiento de la producción impuestas por la economía neoclásica. Su trabajo consiste en una revisión crítica de condiciones como rendimientos crecientes a escala, la sustitución entre factores productivos y el progreso tecnológico, haciendo especial énfasis en la segunda. En su estudio busca comprender el papel que

[38] Los países incluidos en la estimación son: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela. Colombia no es incluido ya que no había datos disponibles para todas las variables requeridas.

desempeñan estas condiciones técnicas en las teorías del crecimiento económico al incluir la variable recursos naturales. Su conclusión es que el planteamiento ortodoxo se abstrae de analizar las restricciones de los recursos naturales en el crecimiento, para Granda, los neoclásicos sugieren que los recursos naturales, el capital y el trabajo son sustitutos *toda vez que no establece distinción física entre estos elementos* (Granda, 2007, p. 112). Granda implícitamente argumenta que esas condiciones técnicas de la teoría neoclásica restringen la inclusión de otros factores como los recursos naturales y energéticos.

En el ámbito colombiano, el trabajo de Oscar Gonzalo Manrique (2008), surgió de la motivación por hacer evidente que la energía es el motor real del crecimiento y de la riqueza material, así que ha venido desarrollando una aproximación para determinar qué tanto la energía podría explicar la formación del Producto Interno Bruto en Colombia, a través de una función de producción, cuyas características permiten endogenizar la energía útil y modelarla con otros factores. Su investigación constituye una perspectiva interdisciplinar e integral que busca mostrar desde un planteamiento conceptual, cualitativo y cuantitativo, el papel que desempeña la energía o exactamente la exergía, que es la parte que efectivamente se convierte en trabajo productivo en el proceso económico. Su enfoque relaciona elementos de la ecología, la termodinámica y la economía, y considera que la energía entra al sistema productivo como exergía y ésta al proceso de producción como trabajo físico, es decir, finalmente es la parte útil de la energía (exergía) la que determina la producción material.

En términos generales, se deduce que el escenario académico en Colombia sobre el papel que desempeñan los recursos naturales y energéticos en la economía, desde un enfoque heterodoxo, es aún incipiente. No se debe desconocer que se encontraron y revisaron diversas investigaciones sobre la articulación del medio ambiente, la energía y la economía, sin embargo, siguen un fundamento ortodoxo y explícitamente no establecen que los recursos energéticos sean factores productivos, así que no se incluyen en la construcción de este estado del arte.

Conclusiones y reflexiones

La historia de la humanidad indica que las sociedades primitivas y tradicionales, dependían principalmente de fuentes renovables para la realización de todas sus actividades. Con el transcurso del tiempo, la sociedad se fue alejando de un contexto de abundancia de recursos naturales, hasta confluir en el mundo contemporáneo que se remonta al consumo excesivo de combustibles fósiles.

Las sociedades preindustriales eran en teoría energéticamente sostenibles porque estaban en función de energías renovables. La base social y productiva, era la energía solar a través de las plantas, las cuales provisionaban alimento y madera. En aquel contexto, la tierra era considerada como un factor básico de producción gracias al proceso de fotosíntesis.

Posteriormente, a raíz de la escasez de madera la civilización inglesa fue la primera en hacer la transición del uso de la energía orgánica, hacia la inorgánica, es decir, se abasteció de la energía solar acumulada en el carbón. La utilización de éste recurso posibilitó el incremento en los niveles de producción per cápita y agregada, al tiempo, el consumo de bienes y servicios se elevó sustancialmente; la sociedad logró tener un mayor nivel de vida en función de la energía contenida en aquel mineral y en las soluciones más tecnificadas que atendían la creciente demanda de la población.

El proceso de Revolución Industrial confluyó en un vertiginoso crecimiento de la producción y, en consecuencia, en una dinámica económica excepcional en Inglaterra, mientras que el resto de países europeos hacia el siglo XIX aún estaban en un modelo preindustrial. Las tecnologías incorporadas durante esta revolución

fortalecieron el crecimiento económico de los países industrializados durante los siglos XIX y XX. Fue éste el caso de Estados Unidos que en función de las grandes reservas de recursos naturales y energéticos, el capital físico y humano, supo potencializar sus ventajas y establecerse como la mayor economía del globo.

De dicha visión histórica se puede concluir que la disponibilidad de recursos energéticos fue elemental desde las primeras civilizaciones, en tiempos de la Revolución Agrícola y luego con las sociedades industriales, la energía configuró un nuevo aparato productivo y multiplicó el trabajo del hombre y las máquinas. Estas últimas también enriquecieron la forma de producir dado que permitían obtener mayores volúmenes de bienes con menos insumos y a costos reducidos, es decir, suscitó al establecimiento de un entramado productivo más eficiente.

También se deduce que la accesibilidad que tuvo el ser humano a la energía, entendiendo a éste como recursos naturales y tierra, constituyó un eje trascendental para incrementar la producción. Mientras que en la economía de origen orgánico el hombre podía producir solamente lo suficiente para su consumo, en la economía de origen mineral (basada en combustibles fósiles y minerales) los procesos de producción resultaron más eficientes y proporcionaron grandes niveles de bienes para ofrecer en el mercado.

Esos procesos de transición de economías orgánicas hacia unas de origen mineral, se fundaron en las diferentes crisis energéticas que enfrentó la humanidad y trasegaron el desarrollo de los sistemas productivos y sociales. Tiempo atrás en Inglaterra, la escasez de madera obligó a hacer uso del carbón, luego llegó el pico de éste en 1913 y surgió la necesidad de trascender hacia el uso del petróleo. De ese modo, los combustibles fósiles empezaron a ejercer supremacía a nivel mundial como motor del proceso económico, cuyas características e impacto ha culminado en la denominada Era de la Civilización Industrial; y si bien han sido de enorme utilidad, el problema es la fuerte dependencia por éstos recursos que son finitos. Dicha dependencia por los recursos energéticos fue notoria con el aumento de los precios del petróleo en los años setenta del siglo XX. Este cuestionó el tema

del crecimiento sin límites y trascendió en la agenda académica para debatir principalmente sobre dos aspectos: de un lado, el agotamiento de los recursos y del otro, los residuos que genera el uso de los combustibles.

Desde la crisis del petróleo se prestó mayor atención en la capacidad de regeneración de la naturaleza y al desarrollo económico y social. Si bien numerosos estudios plasmaron la importancia de entretejer una relación entre la economía y los recursos energéticos, éstos aún son relegados de ser factores fundamentales en la teoría tradicional. La evidencia de la crispación petrolera, la contaminación y deterioro ambiental, no han sido suficientes pruebas para el *mainstream* económico que sigue modelando el crecimiento en función de tres variables principales y reduciendo sus resultados en términos monetarios, alejados de la explicación adecuada de los fenómenos reales y del proceso productivo. Referenciar la frase de Marshall "*la economía tiene algo que decir sobre una gran parte de nuestra vida y del mundo en que vivimos*", sirve como un norte y como un desafío que debe asumir la teoría económica para modelar y maximizar el crecimiento de la economía en función de los límites que impone la naturaleza. Esto es importante ya que la evidencia histórica a nivel mundial muestra que la abundancia de recursos energéticos y su potencia contenida, transformó cada sector productivo de la economía moderna, sin desconocer la función de la tecnología porque gracias a esta complementariedad, el trabajo del campo fue mecanizado, las máquinas desplazaron gran parte del trabajo humano y animal, asimismo, la maquinaria eliminó el duro trabajo de extraer los recursos minerales. Las nuevas fuerzas motrices revolucionaron el transporte y las innovadoras formas de procesamiento de comunicación e información, mejoraron el sector servicios. Esas fuerzas motrices pueden clasificarse dentro de los denominados órganos extrasomáticos que el hombre fue creando a través del tiempo y le ocasionó una estrecha dependencia gracias a las facilidades que esos instrumentos externos le proveen. En últimas, es acertado decir que el hombre por el hecho de depender de órganos extrasomáticos, depende de los recursos naturales y energéticos los cuales constituyen la base para la creación de la producción material, el crecimiento de la economía y el nivel de desarrollo de la sociedad.

No se puede desconocer entonces, que el desarrollado de la innovación técnica y tecnológica ha contribuido en el logro de mayor eficiencia productiva y en consecuencia, ha permitido consolidar el entramado social y productivo, así como ha racionalizado el uso de los recursos naturales. En este sentido, tampoco se puede olvidar que hay dos aspectos primordiales que relacionan estrechamente a la energía con el progreso tecnológico. De un lado, la energía es necesaria para crear nuevas tecnologías y, del otro, es indispensable para la operación de todo lo que represente acervo tecnológico.

Es que si bien los avances a nivel económico y material han estado asociados con el progreso tecnológico, este desarrollo, igualmente, ha sido resultado de la mayor disponibilidad y acceso a los recursos naturales y energéticos, éstos constituyen la base para la creación de innovaciones técnicas. No obstante, la economía neoclásica trató a la energía como un insumo intermedio y sustituible por otros recursos, confiando en que el acervo tecnológico puede cumplir la misma función que el entorno natural y energético.

Del modelo de crecimiento neoclásico se deriva una opaca conclusión ya que le aducen al progreso tecnológico ser el promotor de la producción, aun cuando se representó como una variable exógena y no supieron cómo explicarla. El planteamiento de la economía no ha integrado la perspectiva biofísica en su análisis. Lo anterior se debe al argumento de la teoría económica estándar en que el capital natural y artificial, funcionan como sustitutos, además de la confianza en que el progreso tecnológico ante un eventual agotamiento de recursos, actuará como suplente. Entonces, la economía convencional no reconoció la energía como un factor de producción y tampoco consideró los desechos que se originan a través del proceso de producción.

Esto puede resultar en graves consecuencias globales dado que las decisiones políticas se basan en el modelo Neoclásico del Crecimiento Económico (NCE). De esta forma, las acciones para confrontar el cambio climático global, la pérdida de biodiversidad, el agotamiento del petróleo y los conflictos sociales, entre otros, quedan sometidos a un callejón sin salida y condicionan la existencia de una

sociedad cada día más consumista e individualista que no contempla alternativas efectivas para evitar futuras crisis energéticas y ambientales. De manera que la Bioeconomía es esencial para mitigar estos efectos nocivos sobre el medio ambiente, ya que considera la oferta y capacidad real que tiene el planeta tierra de proveer la materia y la energía necesaria en la producción, considerando también a las posteriores generaciones.

El llamado es para que ese debate entre los ecologistas y economistas que sigue inconcluso, se efectúe. Este hecho abriría la posibilidad de discutir las falencias de la ciencia económica, así como también de rescatar algunos planteamientos ortodoxos como el de los determinantes del crecimiento económico, toda vez que entendieron la función del progreso tecnológico en el proceso productivo, así como la asignación de precios que funciona como mecanismo para reflejar la escasez de recursos. La posibilidad de discutir sería un primer paso hacia la construcción de postulados y de herramientas que eleven el problema de la escasez de recursos y de contaminación, en términos biofísicos y no sólo en términos pecuniarios.

Cuando se hayan redefinido los conceptos y fundamentos de la economía, se entienda la importancia de los recursos naturales y energéticos en la producción y los márgenes que tiene la tierra y la biosfera para soportar la contaminación, entonces se deben enfrentar tres retos esenciales: (1) prepararse para la reducción de las reservas de petróleo; (2) reducir las emisiones de dióxido de carbón drásticamente; (3) invertir a gran escala en las tecnologías de no combustibles fósiles y en la conservación de energía. Estos requieren de métodos y modelos que incorporen adecuadamente las leyes físicas de la energía y la entropía (Kümmel, 2011, p. 179).

Lo cierto es que de este trabajo histórico y conceptual, se derivan no sólo conclusiones en torno a la importancia de considerar a la energía como un factor productivo, sino también en términos propositivos para hacer que el desarrollo y crecimiento económico funcione, siguiendo estas pautas: primero aceptar las deficiencias de la economía neoclásica para explicar los determinantes de la

riqueza material y de la producción. Segundo, reconocer que el sistema económico hace parte del sistema global natural y en consecuencia, debe estar sujeto a sus leyes. Tercero, construir un modelo biofísico que considere la interdependencia de los factores productivos y represente adecuadamente cada una de sus funciones en el proceso de producción. Cuarto, considerar las posibilidades económicas con base en los recursos reales de una nación y de su demanda; y quinto, tomar acciones para reducir la demanda a través de, por ejemplo, el control de natalidad y del cambio de los patrones socio-culturales. Lo anterior evoca a consolidar una teoría de la economía basada en los límites de los recursos naturales y energéticos y en ese contexto, considerar que en el mercado, tanto desde el lado de la oferta como de la demanda, se deben definir unas tendencias alternativas en la configuración de la cesta energética.

La economía y la sociedad requieren de la materia y energía que provee la naturaleza. La economía debe entonces, contemplarse como un subsistema que hace parte del sistema global cerrado mayor, de tal forma que entienda la relación complementaria existente entre los factores de producción y, sobre todo, su base fundamental que es la energía. Se deduce así, que la economía se debe analizar como un sistema de energía de manera que considere el cambio cualitativo que se genera en el proceso económico cuando ingresan los *inputs* de energía y materiales en forma de baja entropía y que luego emanan en forma de bienes o de alta entropía (desechos).

Se debe sintetizar, que en efecto, el nivel de desarrollo y de riqueza de una nación está en función directamente de la energía derivada de todos los recursos naturales. Esta evidencia histórica y conceptual, muestra a la energía como el fundamento de la estructura organizacional moderna y como el factor potenciador del crecimiento productivo experimentado desde el siglo XVIII hasta la actualidad. La energía cumple una función significativa y, por esta razón, es necesaria su representación en el planteamiento económico.

Finalmente, es meritorio mencionar que los aspectos abordados en cuanto a la consideración de la energía como un factor de producción son mucho más

complejos que los aquí presentados. Pero también se debe aclarar que el estado actual de este debate, especialmente en Colombia, está en un estado embrionario, consecuentemente se espera que esta disertación aporte algunos elementos básicos para comprender a la energía como el motor real en el proceso económico.

Bibliografía

Aguilera, F., & Alcantara, V. (1994). *De la economía ambiental a la economía ecológica.* España: Icaria.

Alam, M. (noviembre de 2006). Economic growth with energy. *MPRA* (1260), 1-26.

Apergis, N., & Payne, J. (2010). Energy consumption and growth in South America: Evidence from a panel error correction model. *Energy economics* (32), 1421-1426.

Ayres, R. U., & Warr, B. (2005). Accounting for growth: the role of physical work. *Structural Change and Economic Dynamics, 16*, 181-209.

Banco Mundial. (1992). *World Development Report.* Washington, DC: Banco Mundial.

Barreto Nieto, C., & Campo Robledo, J. (2012). Relación de largo plazo entre consumo de energía y PIB en América Latina: Una evaluación empírica con datos de panel. *Documentos de trabajo* (7), 1-12.

Beaudreau, B. C. (1995). The impact of electric power on productivity. *Energy Economics, 17* (3), 231-236.

Bowden, N., & Payne, J. (2009). The causal relationship between U.S. energy consumption and real output: A dissagregated analysis. *Journal of Policy Modeling, 31*, 180-188.

British Petroleum. (2012). *Statistical Review of World Energy.* Obtenido de http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013.html

Carpintero, Ó. (2006). *La Bioeconomía de Georgescu-Roegen.* Intervención Cultural.

Chang, C.-C., & Soruco Carballo, C. (2011). Energy conservation and sustainable economic growth: The case of Latin America and the Caribbean. *Energy policy* (39), 4215-4221.

Cipolla, C. M. (1979). *Historia Económica de Europa. La Revolución industrial* (Vol. III). (J. Carreras, & R. Vaccaro, Trads.) Barcelona: Ariel.

Cleveland, C. J. (1987). Biophysical economics: Historical Perspective and current research trends. *Ecological Modelling* (38), 47-73.

Cleveland, C. J. (1999). Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Ecological Industrial. (J. G. Mayumi, Ed.) Bostón: Edward Elgar.

Cleveland, C. J., Costanza, R., Hall, C. A., & Kaufmann, R. (1984). Energy and the U.S Economy: A Biophysical Perspective. *Science, 225* (4665), 890-897.

Cleveland, C., & Ruth, M. (1997). Analysis When, where, and by how much do biophysical limits constrain the economic process? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics. *Ecological Economics* (22), 203-223.

Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R., & Norgaard, R. (1999). *Una Introducción a la Economía Ecológica.* México: Compañía Editorial Continental.

Cuevas, H. (1993). *Introducción a la economía.* Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

Cunningham, R. E. (Agosto de 2003). La Energía, historia de sus fuentes y transformación. *Petrotecnia*, 52-60.

Daly, H. E. (1973). *Toward a Steady-State Economics.* San Francisco CA: W.H. Freeman.

Daly, H. E. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. En R. A. Berrío, *¿Economía Ecológica?* (R. A. Berrío, Trad., Vol. 32, pág. (1999)).

Daly, H. E. (septiembre de 1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics, 32 (3)*, 261-266. (R. Berrio , Trad.)

Devine, W. D. (Jun de 1983). From Shafts to Wires: Historical Perspective on Electrification. *The Journal of Economic History, 43* (2), 347-372.

Dincer, I. (2002). The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy, 30*, 137-149.

Dyer, C. (1998). Los orígenes del capitalismo en la Inglaterra Medieval. *BROCAR* (22), 7-19.

Fouquet, R., & Pearson, P. (1998). A thousand Year of Energy Use in The United Kingdom. *The Energy Journal, 19* (4), 1-41.

Geddes, P. (1884). Un análisis de los Principios de la Economía. 23-51. (J. Martínez-Alíer, Recopilador)

Georgescu-Roegen, N. (1975). Energía y Mitos Económicos. *Southern Economic Journal*, 94-122.

Georgescu-Roegen, N. (1996). *La Ley de la Entropía y el Proceso Económico.* (L. G. Andrés, & M. V. López, Trads.) Arragement with Harvard University Press.

Gómez, L. J. (2002). *Introducción a la Ecología Global.* Medellín: Lealon.

Gómez, L. J., & Posada, L. G. (2003). *Cambios en las relaciones Economía-Naturaleza.* Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, DIME.

Gómez, L. J., Vargas, E., & Posada, L. G. (2007). *Economía Ecológica* (primera ed.). Bogotá: IDEA-Universidad Nacional de Colombia.

Gowdy, J., & Mesner, S. (1998). The evolution of Georgescu-Roegen´s Bioeconomics. *Review of Social Economy, LVI*(2), 136-156.

Granda, C. (2006). Elementos para una crítica a las teorías del crecimiento económico basados en los conceptos de capital y cambio tecnológico y sus nexos con los recursos naturales y la energía. 1-191. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Granda, C. (Diciembre de 2007). Condiciones técnicas para el crecimiento sostenible en la teoría económica. *Gestión y Ambiente, 10* (3).

Greenberg, D. (Jun de 1990). Energy, Power, and Perceptions of Social Change in the Early Nineteenth Century. *The American Historial Review, 95* (3), 693-714.

Hall, C. A., & Klitgaard, K. (2012). *Energy and the Wealth of Nations.* New York: Springer Science.

Hall, C., Lindenberger, D., Kümmel, R., Kroeger, T., & Eichhorn, W. (2001). Need to reintegrate the natural science with economics. *Bioscence, 51* (8), 663-673.

International Energy Agency. (2013). *Key World Energy Statistics.* Paris.

Jorgenson, D., & Wilcoxen, P. (1993). Enery, the environment, and economic growth. En A. Kneese, & J. Sweeney, *Handbook of natural resource and energy economics* (Vol. 3). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Kolstad, C., & Krautkraemer, J. (1993). Natural resource use and the environment. En A. Kneese, & J. Sweeney, *Handbook of natural resource and energy economics* (Vol. 3). Amsterdam: Elsevier.

Kostic, M. M. (2007). Energy: Global and Historical background. *Encyclopedia of Energy Engineering*, 1-15. Dekalb, Illinois, USA: Taylor & Francis.

Kümmel, R. (1982). The impact of energy on industrial growth. *Energy, 7* (2), 189-203.

Kümmel, R. (2011). Economy. En R. Kümmel, *The second law of economics* (págs. 171-273). New York: Springer.

Kümmel, R., Henn, J., & Lindenberger, D. (2002). Capital, Labor, Energy and Creativity: Modeling Innovation Diffusion. *Structural Change and Economic Dynamics, 13*, 415-433.

Kümmel, R., Strassl, W., Gossner, A., & Eichhorn, W. (1985). Technical Progress and Energy Dependent Production Functions. *Journal of Economics, 45* (3), 285-311.

Landreth, H., & Colander, D. (2006). *Historia del pensamiento económico.* (E. Rabasco, Trad.) Madrid: Mc Graw Hill.

Mallorquín, C. (2003). Philip E. Mirowski o la vida secreta de la economía. *Estudios Sociológicos, XXI* (61), 167-181.

Manrique, O. G. (Mayo de 2008). Relaciones Energía - Crecimiento Económico: Un Análisis Histórico, Conceptual y Crítico. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

Marshall, A. (1920). Principles of Economics. En A. Marshall, *The substance of economics* (8ª ed.). London: Abridged Edition.

Martínez-Alier, J. (1994). *De la Economía Ecológica al Ecologismo Popular.* Barcelona: Icaria Editorial.

Martinez-Alier, J. (1994). Ecología humana y economía política. En F. Aguilera Klink, & V. Alcántara, *De la economía ambiental a la economía ecológica* (págs. 213-221). Barcelona: Icaria:Fuhem.

McPherson, N. (1994). *Machines and Economic Growth.* London: Natalie McPherson.

Meadows, D. (1972). *Los límites del crecimiento.* México: Fondo de cultura económica.

Mei, L., Chao, M., Dongpu , Y., & Huizheng , L. (2013). Decomposition of embodied exergy flows in manufactured products and implications for carbon tariff policies. *Asia Europe Journal*, 265-283.

Mirowski, P. (septiembre de 1988). Energy and energetics in Economic Theory: A review Essay. *Journal of Economic Issues, XXII* (3), 811-830.

Mirowsky, P. (1984). Physics and the "marginalist revolution". *Cambridge Journal of Economics*, 361-379.

Mishan, E. (1967). *The cost of economic growth.* London: Staples P.

Naredo, J. (1994). Fundamentos de la economía ecológica. En F. Aguilera, *De la economía ambiental a la economía ecológica* (págs. 374-404). Barcelona: Icaria-Fuhem.

Naredo, J. M. (1987). *La economía en evolución.* Marid: Siglo XXI de España Editores.

Naredo, J. M. (2001). Economía y Sostenibilidad: La economía ecológica en perspectiva. *Polis Revista de la Universidad Bolivariana, 1* (002), 1-28.

Periman, R. D. (2004). Early Industrial World, Energy. *Encyclopedia of Energy, 1*, 849-858. Albuquerque, Nex Mexico, Estados Unidos: Elsevier.

Pigou, A. C. (1920). *The economics of welfare.* London: MacMillan.

Podolinsky, S. A. (1880). El trabajo del ser humano y su relación con la distribución de la energía. En J. Martínez-Alíer (Ed.), *Los Principios de la Economía Ecológica. Textos de: P. Geddes, S.A Podolinsky y F.Soddy* (págs. 63-136). Madrid: Fundación Argentaria.

Pokrovski, V. N. (2003). Energy in the theory of prouction. *Energy, 28*, 769-788.

Rodriguez, R. (2002). *Economía y recursos naturales una visión ambiental de Cuba: Apuntes para un libro de texto.* Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.

Roma, A., & Pirino, D. (2009). The extraction of natural resources: the rol of thermodynamic efficiency. *Ecological economics*, 2594-2606.

Romer, D. (2006). *Macroeconomía Avanzada* (Tercera ed.). (G. Trinidad, Trad.) Madrid: McGraw-Hill.

Rosa, E. A., Machlis, G. E., & Keating, K. M. (1988). Energy and Society. *Annual Review of Sociology, 14*, 149-172.

Rosenberg, N. (1998). The role of electricity in industrial development. *Energy Journal, 19* (2), 7-18.

Ruiz, P. (2011). Estimación de los costos relativos de las emisiones de gases de efecto invernadero en las ramas de la economía mexicana. *El trimestre Económico, LXXVIII* (309), 173-191.

Sala-i-Martin, X. (2000). *Apuntes de Crecimiento Económico.* Espana: Antoni Bosch.

Schoijet, M. (2002). Historia de la energía. *Elementos, 44*, 51-57.

Schultz. (2001). *Historia Económica de Europa, 1500-1800.* (J. A. Padilla, Trad.) Madrid: Siglo Veintiuno de España Editores, S.A.

Sciubba, E. (2004). Exergoeconomics. En *Encyclopedia of energy* (Vol. 2). Elsevier.

Sedillot, R. (1977). *La historia del petróleo.* (L. I. Sandoval, Trad.) Bogotá: Pluma.

Smil, V. (1994). *Energy in World History.* Boulder, Colorado: Westview Press.

Smil, V. (2003). *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties.* Cambridge, MA: The MIT Press.

Smil, V. (2004). World History and Energy. *Encyclopedia of Energy, 6*. (549-561, Ed.) Petten, The Netherlands: Elsevier.

Smil, V. (2006). *Energy.* Oneworld publications.

Smil, V. (2008). *Energy in Nature and Society.* Massachusetts Institue of Technology.

Solow, R. M. (1994). La Economía de los Recursos o los Recursos de la Economía. En F. A. Klink, & V. Alcántara, *De la Economía Ambiental a la Economía Ecológica* (págs. 83-97). Barcelona: Fuhem e Icaria.

Stern, D. (2011). The role of energy in economic growth. (R. Costanza, K. Limburg, & I. Zubiszewski, Edits.) *Ecological Economics Reviews* (1219), 26-51.

Stern, D. I. (Octubre de 2010). The Role of Energy in Economic Growth. (T. A. Crawford School of Economics and Government, Ed.) *Centre for Climate Economics & Policy* (3.10), 1-50.

Stern, D., & Cleveland, C. (2004). Energy and Economic Growth. *Rensselaer Polytechnic Institute* (0410), 1-41.

Stern, D., & Kander, A. (2012). The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern. *The Energy Journal, 33* (3), 125-152.

Szargut, J. (2002). Application of exergy for the determination of the proecological tax replacing the actual personal taxes. *Energy*, 379-389.

Toman, M. E., & Jemelkova, B. (2003). Energy and Economic Development: An Assesment of The state of knowledge. *The Energy Journal, 24* (4).

UPME. (2013). *Cadena del Petróleo.* Bogotá D.C: UPME.

Warr, B., & Ayres, R. (2010). Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth. *Energy, 35*, 1688-1693.

White, L. A. (1943). Energy and the Evolution of Culture. *American Anthropologist, 45* (3), 335-356.

Worthy, A. (2011). *Economics and energy.* Delhi: The english press.

Wrigley, E. (1992). *Gentes, ciudades y riqueza: La transformación de la sociedad tradicional.* (E. Gavilán, Trad.) Barcelona: Crítica.

Wrigley, E. (1992). Los economistas clásicos y la revolución industrial. En E. Wrigley, *Gentes, Ciudades y Riqueza. La transformación de la sociedad tradicional* (págs. 37-69). Barcelona: Crítica.

Wrigley, E. (1993). *Cambio, Continuidad y Azar. Carácter de la Revolución Industrial Inglesa.* Barcelona: Crítica.

Wrigley, E. (2010). *Energy and the English Industrial Revolution.* New York: Cambridge University.

Wrigley, E. (2010). The industrial revolution and energy. En E. Wrigley, *Energy and the English Industrial Revolution* (págs. 239-250). New York: Cambridge University.