

Ciento cincuenta años de combustión de hidrocarburos fósiles: las alternativas emergentes

Cento cinquenta anos de combustão de hidrocarbonetos fósseis: as alternativas emergentes

One hundred and fyfty years of combustion of fossil hydrocarbons: the emergent alternatives

Jorge Laine¹

Recepción: 18-abr-2009/Modificación: 26-jun-2009/Aceptación: 06-jul-2009
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Luego de ciento cincuenta años de haberse perforado los primeros pozos comerciales de petróleo que condujeron al uso intensivo de combustibles líquidos para mover los vehículos de transporte, se está arribando al pico de las reservas de petróleo del planeta. Queda aún una buena porción por gastar, con la expectativa de que las consecuencias sean mejores que en la primera parte, la cual ha implicado varias guerras y deterioros del ambiente. Este ensayo aporta un resumen sobre la historia de los combustibles fósiles y sobre la prospectiva de las alternativas energéticas emergentes, poniendo énfasis en la bioenergía como una alternativa para la transición entre la actual era de la combustión y la nueva era de la energía limpia.

Palabras claves: combustión, hidrocarburos fósiles, petróleo, alternativas energéticas, bioenergía.

¹ PhD, jlaine@ivic.ve, investigador emérito, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Caracas–Venezuela.

Resumo

Depois de cento cinquenta anos de perfurar os primeiros poços comerciais de petróleo, o que levou ao uso intensivo de combustíveis líquidos para mover veículos de transporte, estamos chegando ao pico das reservas mundiais de petróleo do planeta. Ainda temos uma boa porção para gastar, com a esperança que as consequências serão melhores que na primeira parte, a qual implicou várias guerras e deteriorações do ambiente. Este ensaio lida com a história de combustíveis fósseis e com o potencial das alternativas energéticas emergentes, dando ênfase a bio-energia como uma alternativa para a transição entre a idade de combustão atual e a nova idade de energia limpa.

Palavras chaves: combustão, hidrocarbonetos fósseis, petróleo, alternativas energéticas, bio-energia.

Abstract

After one hundred fifty years of drilling first commercial petroleum wells that led to the intensive use of liquid fuels to move transport vehicles, we are arriving at the peak of the world-wide petroleum reserves. Yet, we still have a good portion for spending, with the hope that the consequences will be better than in the first part, which has implied several wars and deteriorations of the environment. This essay brings a review about the history of fossil fuels and with the prospective of the emergent energetic alternatives, placing emphasis on bioenergy as an alternative for the transition between the actual combustion age and the new age of clean energy.

Key words: combustion, fossil hydrocarbons, petroleum, energy alternatives, bioenergy.

1 Introducción

La combustión es uno de los más importantes y antiguos descubrimientos del ser humano. El hombre de la prehistoria empezó a abandonar sus cuevas de invernadero luego que descubrió como hacer fuego con madera, tal como todavía lo hacen los indígenas frotando una varita con un trozo de tronco. La madera continuó siendo el combustible por milenios, manteniendo despierta la meditación del ser humano durante sus horas de descanso frente a una chimenea, meditación que probablemente condujo a muchas ideas innovadoras durante el desarrollo de la civilización humana.

Una de esas ideas, tal vez la más importante, fue la rueda, con la cual las bestias dejaban de servir de transporte para un solo individuo, para proveer

la energía para el transporte por medio de carretas. Otro primitivo descubrimiento importante para el transporte fue la vela, y así por mucho tiempo la vela en el mar y la rueda en la tierra fueron los antecesores de la siguiente gran innovación para el transporte: la máquina de vapor [1]. Probablemente, las primeras ideas acerca de tal máquina surgieron en monasterios donde monjes dedicados y curiosos lograron transformar el vino en brandy desarrollando el alambique, que en esencia utiliza el mismo principio de combustión externa de la máquina de vapor, es decir, al hervir agua en una caldera, el vapor produce la presión para mover un pistón que acciona la rueda.

Aunque todavía existen funcionando algunos trenes de vapor que usan madera como combustible [2], estos se han convertido en reliquias ya que el auge del desarrollo del transporte con motores de combustión continuó aceleradamente. El carbón mineral substituyó a la madera y la idea de substituir a la máquina de combustión externa por una más eficiente basada en la combustión interna empezó a aparecer. Es entonces cuando surge el uso de los combustibles líquidos para mover estas máquinas más sofisticadas.

2 El auge de la combustión de hidrocarburos fósiles (HCF)

El mismo principio del alambique fue empleado para producir los primeros combustibles líquidos a partir de HCF, derivándose así el proceso de refinación [3] consistente en un craqueo térmico [4] acompañado con una destilación. En principio, el HCF (carbón o petróleo) se somete a calor para producir volátiles, y luego se enfría para formar el preciado condensado de combustible líquido, quedando un residuo de breas, residuo que en su forma más sólida: el coque, representa un material fundamental para la industria metalúrgica moderna.

La producción de combustibles líquidos aumentó significativamente debido a los hallazgos de los yacimientos de petróleo. Los primeros pozos comerciales fueron perforados hace aproximadamente 150 años [5], originando desde entonces un gran auge de vehículos para el transporte (carros, motocicletas, buses, trenes, barcos y aviones) prácticamente marcando el inicio de la revolución industrial. Cabe destacar que los primeros vehículos desarrollados por Henry Ford y Rudolf Diesel usaron etanol de fermentación y éster de aceite vegetal respectivamente (los ahora denominados biocombustibles) [6];

pero luego las grandes producciones en serie fueron abastecidas por la creciente industria petrolera.

De esta manera se constituyeron dos industrias dependientes una de otra, probablemente las más poderosas del planeta: la industria del petróleo y la industria automotriz. Dos tipos de motores de combustión interna fueron desarrollados [7] requiriendo de dos tipos de combustible líquido: la gasolina y el gasoil. En el primer tipo, la explosión de una mezcla de aerosol comprimido de gasolina y aire se efectúa por una chispa (bujía), mientras que en el segundo, la explosión de la mezcla de gasoil y aire ocurre espontáneamente por la compresión. La gasolina se caracteriza por el octanaje, lo que quiere decir que ella no debe detonar si no hay chispa, mientras que el gasoil si detona al ser comprimido en ausencia de chispa.

Paralelamente con el nacimiento de los motores de combustión, el descubrimiento de la electricidad implicó el establecimiento de centrales de generación de electricidad a partir de la combustión de HCF. En principio, la quema del HCF implica un chorro gaseoso que hace rotar una hélice (turbina) cuyo eje se conecta al generador de la electricidad. Partiendo de este mismo principio, un chorro de agua o de viento se usa en las centrales hidroeléctricas y eólicas respectivamente.

No cabe duda que los HCF han sido también responsables del gran auge de la construcción, pudiéndose estimar que, lejos de estar en la edad de piedra, se ha usado mas piedra molida en estos últimos 150 años que la usada por los ancestros en 150 mil años.

Además de las plantas generadoras de electricidad y de los medios de transporte, otros importantes sectores cuya existencia depende de los HCF son: la industria metalúrgica, la petroquímica (plásticos y fertilizantes), las productoras de cemento, y la calefacción de viviendas y otros recintos durante el invierno en zonas templadas. Toda esta dependencia hace difícil imaginar un mundo sin HCF.

Sin lugar a dudas, el petróleo es el principal protagonista de la presente era de la combustión, no sólo por su imprescindible función energética sino también por su influencia en la economía global; y a pesar de los esfuerzos de los líderes en investigación y desarrollo sobre la exploración y explotación de nuevos depósitos (e.g., exxon, shell, etcétera), la reconocida teoría del pico de Hubbert [8] pronostica que estamos actualmente en la década del tope de las

reservas mundiales probadas de petróleo convencional (ver figura 1). Si el consumo global actual de 30 Gbbl/año se mantiene, habría un plazo de 50 años para el agotamiento de esas reservas que actualmente suman unos 1.500 Gbbl [9]. Esta incertidumbre hace pensar que la producción de hidrocarburos líquidos a partir de carbón mineral, que abunda mucho más que el petróleo, podría ser una alternativa emergente usando procesos de licuefacción del carbón ya establecidos [10] aunque casi olvidados por el actual auge del petróleo.

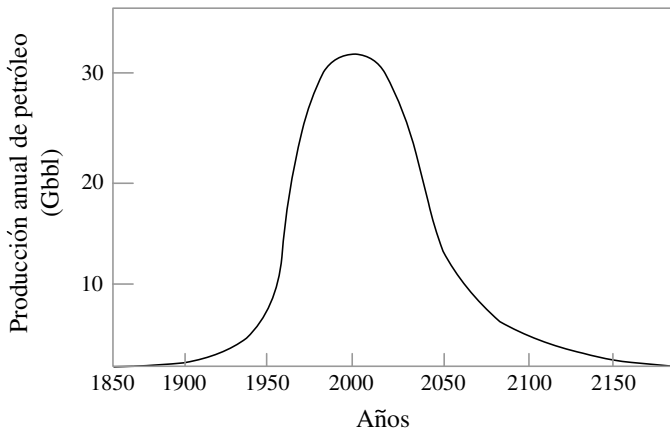
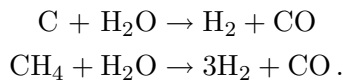
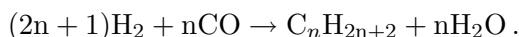


Figura 1: la curva de Hubbert

Uno de estos procesos es la síntesis Fischer–Tropsch, desarrollada en Alemania a comienzos del siglo pasado [11]: a partir del HCF, previa oxidación parcial con vapor de agua (*steam reforming*), se obtiene el llamado gas de síntesis (*syngas*: $\text{H}_2 + \text{CO}$). Por ejemplo, en los casos ideales del carbono elemental y del metano:



Luego se produce por vía catalítica, a partir del gas de síntesis, un combustible líquido referido como sintético (*Synfuel*) constituido principalmente por parafinas:



El líquido así obtenido es luego sometido a los procesos convencionales de refinación arriba citados (*cracking*, destilación, etcétera) para la obtención de las fracciones deseadas: gasolina, kerosén, etcétera.

En la segunda guerra mundial, al no tener los alemanes un suministro permanente de petróleo, aplicaron por primera vez el proceso Fischer–Tropsch usando carbón mineral como una alternativa para poder mover sus vehículos de combate. Realmente, las dos guerras mundiales funcionaron como un catalizador para acelerar innovaciones en los vehículos de transporte y en sus combustibles. La guerra del golfo Pérsico en 1990, no cabe duda que fue motivada en parte por la estrategia de controlar las grandes reservas de petróleo localizadas en esa zona. Entre las crisis vinculadas al petróleo están: las guerras por el control del canal de Suez (“la autopista del petróleo”) en 1956 y 1967, la cuarta guerra árabe–israelí que condujo al embargo petrolero de 1973, y las recientes incursiones guerrilleras en instalaciones petroleras del delta del Níger en África, y en secuestros de barcos tanqueros; además de los deterioros ambientales como los causados por derrames de petróleo y por emisiones contaminantes (tratadas en la sección siguiente).

Las reservas probadas de HCF convencionales (i.e., aquellas reservas económicamente extraíbles por los métodos convencionales) suman globalmente cerca de 1.000 Gton C (C=carbono elemental), de las cuales el 70 % son de carbón mineral, 20 % de petróleo y 10 % de gas natural [12].

Nota: en unidades estándar, 1 ton C equivale a 8 bbl de petróleo o a 70 mil pie³ de gas natural. Cabe destacar que este aproximado de reservas probadas (1.000 Gton C) son probablemente una pequeña fracción del total existente desde el punto de vista geológico, siendo la mayor parte de ese total difícil de explotar (i.e., “no convencionales”), por ejemplo: gas natural en zonas alejadas (*stranded gas*), carbón mineral en mantos subterráneos muy profundos, petróleos pesados y arenas bituminosas. También hay enormes cantidades de hidrato de metano [13] disuelto en los sedimentos marinos a grandes profundidades y en zonas de *permafrost* (tierra congelada).

El renacimiento de Fischer–Tropsch servirá en un futuro cercano para reemplazar al exhausto petróleo, no sólo por carbón convertido en *synfuel* líquido, sino también por gas natural convertido en GTL (del inglés: *gas-to-liquid*), y aun por BTL (*biomass-to-liquid*) obtenido a partir de madera o desechos agrícolas [14, 15]. Una gran ventaja del GTL es que, produciéndolo *in-situ*

[16], se evita la necesidad de transporte usando largos gasoductos o tanqueros criogénicos de LNG (gas licuado).

3 La combustión de HCF como una causa del deterioro ambiental

Las diferencias entre el funcionamiento de los motores diesel y los de bujía citadas, implican que los primeros producen más aerosol de partículas (humo) y ozono [17], mientras que los segundos pueden emitir más óxidos de nitrógeno (NO_x) debido a la reacción entre los componentes del aire ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) por el recalentamiento del motor. Las reacciones fotoquímicas atmosféricas transforman los NO_x en ácido nítrico produciendo la lluvia ácida que daña la biósfera. Los óxidos de azufre, provenientes del azufre contenido en el combustible, también contribuyen con la formación de lluvia ácida. Las emisiones de óxidos de azufre han sido causantes de catástrofes atmosféricas asociadas a neblinas tóxicas (*smog*) como, por ejemplo, la ocurrida en Londres a mediados del siglo pasado [18], cuando murieron más de 3.000 personas por afecciones pulmonares en una semana de invierno. En ese caso las emisiones provenían principalmente de la combustión de carbón mineral en chimeneas de calefacción.

Estrictos protocolos han conducido a la implantación obligatoria del proceso de hidrodesulfuración para eliminar el azufre de los combustibles [19], y de convertidores catalíticos y filtros en automóviles para evitar emisiones de NO_x y otros contaminantes como HC y CO [20]. Sin embargo, actualmente en ciudades como Beijing, México, Tokio, etcétera, así como también en toda la zona de mayor densidad demográfica mundial: comprendida entre la India y China, ocurre la neblina conocida como *Brown Cloud*, detectada aún desde satélites.

Ciertos fenómenos atmosféricos tienden a eliminar las neblinas tóxicas en latitudes tropicales [21], además de que la biosfera tropical es más resistente a la lluvia ácida. Afortunadamente, Caracas, siendo una ciudad con enormes emisiones automotrices, se localiza en un valle alargado en la misma dirección de los vientos que barren la contaminación. Por el contrario, la ciudad de Los Ángeles, al igual que Santiago de Chile, tiene una cordillera perpendicular a la dirección del viento que impide la salida del smog fotoquímico (NO_x + ozono

entre otros), lo que ha causado que esa ciudad sea la cuna de la mayoría de los estrictos protocolos arriba citados.

Hace menos de tres décadas que el CO₂ empezó a ser catalogado también como otro contaminante de la atmósfera. Ciertamente, el gran auge de los medios de transporte y de la electricidad ha implicado la extracción de átomos de carbono que estaban secuestrados en yacimientos fósiles del subsuelo, para liberarlos por combustión sumándose a la atmósfera en forma de CO₂. Las fuentes estacionarias provocan alrededor del 70 % de las emisiones y el resto proviene de los tubos de escape de los vehículos [22]. Esto está causando, según lo afirman muchos científicos asociados al Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [23], un calentamiento global debido al efecto invernadero, al cual se atribuyen trastornos ambientales como, por ejemplo, el aumento del nivel del mar y el desabastecimiento de agua dulce por el derretimiento de los glaciares, el aumento de la frecuencia e intensidad de huracanes, desertificación por largas sequías, muerte de barreras coralinas (*coral bleaching*), entre otras.

Una de las más renombradas evidencias sobre este efecto es la llamada curva del palo de jockey [24], la cual muestra que durante los últimos mil años, la anomalía de la temperatura promedio del hemisferio norte, se ha comportado idénticamente a la concentración atmosférica de CO₂, manteniendo niveles relativamente bajos hasta hace aproximadamente 150 años, cuando ambos parámetros comenzaron a crecer en forma exponencial (ver figura 2), aumentando aproximadamente en 100 ppm la concentración de CO₂ y en 1°C el calentamiento global [25]. Todo esto ha conducido al extremo de que actualmente las emisiones de CO₂ son tratadas como una mercancía de acuerdo al Protocolo de Kyoto [26]. Mercancía que también incluye a los demás contaminantes mediante el establecimiento de equivalencias de potencial del calentamiento global respecto al CO₂ (e.g., un mol de CH₄ equivale al efecto invernadero de 20 moles de CO₂, uno de NO₂ equivale a 300 de CO₂, etcétera). El mercado de los créditos de carbono establece que aquellos productores de servicios o bienes de consumo que emitan CO₂ deberán emitir créditos que serían otorgados a quienes en sus procesos de producción capturen o secuestren CO₂.

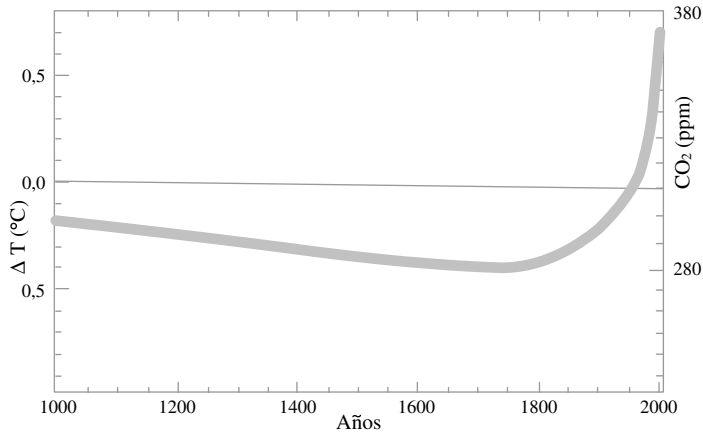


Figura 2: la “curva del palo de jockey”

El efecto invernadero [27] se debe, en el caso del CO_2 , a la capacidad de transformar la energía radiante infrarroja en energía termodinámica a través de la vibración de los dobles enlaces químicos de la molécula $\text{O}=\text{C}=\text{O}$. Así, la energía que llega del sol durante un día, entra a la atmósfera en forma de fotones con longitud de onda en el rango de la radiación ultravioleta visible. Estos reducen su energía al rango de la radiación infrarroja al chocar con las moléculas de la atmosfera liberando el calor que mantiene la temperatura del planeta, es decir, una parte de la energía radiante no rebota de vuelta al espacio extraterrestre ya que se convierte en calor, y el resto si lo hace; pero cada día una cantidad de ese resto, mayor que la del día anterior, se queda gracias a las nuevas moléculas de CO_2 añadidas por el ser humano diariamente a la atmósfera, por la combustión de los HCF.

La atmósfera contiene actualmente 750 GtonC en forma de CO_2 [25], por lo que si se sigue quemando los HCF al ritmo actual de 6 GtonC/año, se aumentaría teóricamente la concentración atmosférica de CO_2 a casi el doble en este mismo siglo, lo cual podría implicar, según los pronósticos del IPCC [23], un aumento en el calentamiento global de 2–4° C. Por otra parte, los depósitos de hidrato de metano, ya citados, representan un potencial peligro global, ya que el metano es un gas de efecto invernadero aún mucho más potente que el CO_2 , y podría ocasionar la auto-aceleración del calentamiento

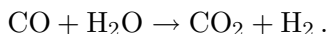
global al ser emitido en forma espontánea o descontrolada al irse ablandando el *permafrost*, o por el calentamiento del fondo de los océanos. De hecho, en el mismo período en que el CO₂ aumentó de 280 a 380 ppm, figura 2, el metano aumentó de 700 a 1750 ppb [25].

El movimiento ambientalista acerca del calentamiento global está acen- tuando el dilema de decidir acerca de comenzar acciones que luego resulten innecesarias, o de no comenzar acciones para que luego sea muy tarde para comenzarlas.

4 Alternativas para remplazar a la combustión de HCF

El hidrógeno (H₂) es una alternativa de energía limpia ideal para sustituir a los combustibles de HCF si lo que se quiere son motores que no emitan CO₂, ya que el H₂ sólo produce agua como producto de su combustión, ya sea usándolo en motores de chispa o en celdas de combustible. Estas últimas emplean el principio de la electrólisis a la inversa, y son más eficientes que los motores de combustión [28]. Sin embargo, debido a la muy baja densidad del H₂, se hace necesario comprimirlo a muy alta presión para almacenarlo, lo que además de aumentar los costos, también aumenta el riesgo de fugas. Aún disminuyendo el factor riesgo (e.g., usando tanques criogénicos), los vehículos accionados con H₂ necesitarían unos tanques de combustible relativamente grandes que podrían limitar la aerodinámica del transporte, particularmente en el caso del transporte aéreo.

De todas formas, si se pretende usar H₂ como combustible con el propósito de evitar emisiones de CO₂, habría que cambiar la actual tecnología para su producción, basada en la obtención de gas de síntesis (CO + H₂) a partir de HCF empleando el proceso *steam reforming*, señalado en el apartado 2, empleándose además la reacción *water-gas-shift*



Luego el H₂ es separado del CO₂ por destilación.

Por lo tanto, la vía para producción de H₂ a partir de HCF implica emi- siones de CO₂ en iguales cantidades que si se quemara directamente el HCF. Sin embargo, existe la posibilidad de evitar emisiones a la atmósfera de CO₂

en factorías estacionarias usando inyección subterránea [29]. Actualmente, el tema sobre la captura y secuestro de CO_2 (citado en la literatura en inglés como CCS), ha dado lugar a grandes proyectos para la producción de energía y/o H_2 a partir de carbón mineral, inyectando a altas profundidades del subsuelo el CO_2 producido [30]. Si la factoría está ubicada en un sitio apropiado, la inyección puede a su vez servir para recuperar parte de las reservas de HCF “no convencionales”, e.g., petróleo remanente en yacimientos desgastados [31], o gas natural asociado en mantos profundos de carbón mineral [32].

Otra alternativa de energía limpia son las celdas fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz solar. Esta alternativa debe suponer una descentralización de la distribución de la energía eléctrica, ya que el establecimiento de grandes centrales (equivalentes a las actuales que funcionan con HCF) implicaría costosos paneles solares ocupando áreas enormes. Por ejemplo, la más grande central fotovoltaica construida hasta el presente produce 60 MW [33], potencia casi despreciable en comparación con las obtenidas en grandes centrales de generación de electricidad por combustión de HCF que abundan en todo el mundo, algunas con potencias que alcanzan los 5.000 MW [34]. Además, sería también necesario el almacenamiento de grandes cantidades de energía (en baterías recargables) para compensar las variaciones de la radiación solar durante los cambios del día a la noche, o de cielo despejado a cielo nublado. Con pequeñas centrales, las viviendas y edificaciones pueden auto-abastecerse de electricidad, al menos durante cierta época del año, al tener paneles solares en los techos o ventanas. El problema de la intermitencia de esta alternativa energética podría ser solucionado al generar electricidad junto a H_2 por electrólisis durante el día, para luego usar el H_2 en celdas de combustible en la noche [35].

Otra alternativa, aunque actualmente poco limpia y no-renovable, es la energía nuclear (i.e., la fisión nuclear, ya que la fusión nuclear pudiera ser catalogada como renovable y limpia si se logra controlar en el futuro). Con centrales que pueden alcanzar potencias tan altas como las obtenidas en las más poderosas centrales que operan con HCF [34], algunos países producen a partir de energía nuclear un alto porcentaje de su consumo de electricidad (e.g., Francia 80%) [36], pero algunos accidentes ocurridos, como el de Chernobil, así como también la dificultad para deshacerse de los desechos radiactivos de la fisión, han sido factores negativos que han frenado la expan-

sión de esta alternativa. Sin embargo, así como transcurrió un período entre el desarrollo de la máquina de vapor y el desarrollo de los modernos motores de combustión interna, es de esperar también otro período para la mejora de estas alternativas emergentes.

La alternativa que ofrece actualmente las mayores potencias es la energía hidráulica, con centrales que superan los 10.000 MW (e.g., Guri en Venezuela), aunque probablemente ya no abundan en el mundo muchos sitios apropiados para otras grandes represas. Por otra parte, la alternativa que crece más rápidamente en la actualidad, al menos en los países más desarrollados, es la energía eólica [37].

Con excepción de la bioenergía, que es tratada en la sección siguiente, las demás alternativas energéticas para substituir los HCF: hidráulica, nuclear, solar, eólica, geotérmica, etcétera, son energías primarias destinadas a producir electricidad y no combustible. Por este motivo, la aparición de vehículos de transporte a base de baterías eléctricas recargables está comenzando; en particular, los llamados auto híbridos [38], que alternan el recorrido usando un motor eléctrico de baterías recargables y un motor de combustión convencional, para así poder realizar largos recorridos sin necesidad del lento proceso de recarga de las baterías. Una solución para el problema de la recarga en vehículos 100 % eléctricos es la posibilidad del intercambio rápido de la batería descargada por otra cargada en estaciones de servicio.

Paradójicamente, hemos arribado a la necesidad de nuevos ingenios para resolver los problemas creados por el éxito de la ingeniería.

5 La bioenergía como alternativa de transición

En la sección anterior se trataron varias alternativas energéticas que no emiten CO₂ a la atmósfera. A continuación se trata otra alternativa, la bioenergía, que aunque emite CO₂, no aumenta su concentración atmosférica, ya que lo recicla a través de la fotosíntesis.

La bioenergía está actualmente en segundo lugar (después de la hidráulica, seguida por la solar y la eólica) en el ranking de energías renovables en uso a nivel global [39]. Con el aumento de la cantidad de CO₂ en la atmósfera producto de la combustión de los HCF, debería incrementarse la actividad de la fotosíntesis aumentando la cantidad de biósfera para así revertir el equilibrio

del carbono entre la atmósfera y la biosfera; tal como queda implícito en el esquema mostrado más adelante.

La fotosíntesis es una reacción química foto-catalizada por el magnesio presente en la clorofila de las hojas de las plantas, empleando la energía del sol para combinar las moléculas de CO_2 y H_2O de la atmósfera, formando las moléculas constituyentes de la estructura de los vegetales (ligno-celulosa, carbohidratos, aceites, etcétera). Estos constituyentes pueden ser transformados por el hombre en biocombustible líquido, por ejemplo, etanol a partir del carbohidrato de la caña de azúcar usando el antiguo proceso de la fermentación. En el caso del aceite de ciertas oleaginosas, e.g., palma africana y soya, el aceite puede ser convertido en compuestos tipo éster para su uso como biodiesel. Otro ejemplo es el combustible BTL, anteriormente citado, obtenido usando el gas de síntesis a partir de la ligno-celulosa. En vista que la celulosa es el principal producto terrestre de la fotosíntesis, su conversión en etanol usando procesos de fermentación ha sido el objeto de recientes investigaciones [40]. Además, los criaderos ictícolas están en etapa de desarrollo para la producción de biocombustible a partir de algas, buscando aprovechar la ventaja de que la velocidad de la fotosíntesis es mucho mayor en las algas que en los vegetales terrestres [41]. Estos desarrollos ictícolas tienen previsto el uso del CO_2 capturado en industrias adyacentes que queman HCF. Cabe destacar que los biocombustibles no contienen azufre ni HC aromáticos, características contaminantes que si tienen los combustibles de HCF.

Sin embargo, excluyendo a los criaderos ictícolas, la producción de biocombustibles a gran escala para sustituir a los combustibles fósiles líquidos (i.e., gasolina y gasoil) podría competir por el uso de la tierra con la producción destinada a la alimentación humana, lo que podría afectar el suministro de alimentos; particularmente en países poco desarrollados donde la productividad agrícola puede ser hasta cinco veces menos eficiente que en países altamente desarrollados [42]. Como un ejemplo, para sustituir la actual producción de petróleo por biocombustibles a nivel global, necesitaríamos teóricamente tres veces más extensión de tierra que la necesaria para alimentar a toda la población humana [42]. Desde otro punto de vista, el uso de la biomasa para satisfacer todas las necesidades energéticas actuales en el mundo implicaría la destrucción total de todos los ecosistemas madereros [43]. Por lo tanto, aunque la alternativa de sustitución más cercana es la bioenergía, ya que la

tecnología para su uso es prácticamente la misma que para el uso de los combustibles fósiles, no debería ser tomada como una alternativa definitiva, sino más bien como un vehículo de transición entre la actual era de la combustión de HCF y la futura era de las energías limpias.

En vez de tener la bioenergía en forma de biocombustible (e.g., bioetanol, biodiesel), la bioenergía puede obtenerse directamente a partir de la biomasa usando procesos de pirólisis [44, 45]; por ejemplo, en Australia están funcionando plantas pilotos que usan como materia prima árboles de eucalipto [46], para producir electricidad (por combustión de los volátiles de la biomasa), además de aceite de eucaliptos (por destilación previa de las hojas) y un material carbonáceo poroso (residuo de la pirólisis) que puede utilizarse como un carbón activado o como un “biochar” (también referido como “agrichar” para resaltar su aplicación agrícola). Este último está siendo considerado como un medio que hace más eficiente la aplicación de fertilizantes agrícolas, sirviendo además su porosidad como de hábitat para facilitar el desarrollo de microorganismos benefactores de la rizosfera, como bacterias rizobium y hongos micorrizas [47, 48, 49, 50].

La creación de bosques en zonas áridas o infértiles: aforestación [51] y la aplicación de biochar en suelos [52], representan alternativas de CCS (citado en la sección 4): por una parte se estaría capturando el CO_2 de la atmósfera por el crecimiento de nuevos árboles, y por la otra, se estarían secuestrando átomos de carbono en el suelo por la aplicación del biochar. El carbono orgánico de la rizosfera, donde se puede incluir el biochar, representa en promedio el más grande reservorio de carbono de los ecosistemas terrestres: 1,400 Gton C versus 600 de la biosfera y 750 de la atmósfera [53], por lo que aún pequeños cambios en este reservorio pueden afectar en forma significativa el balance del carbono global, y por ende también el clima global [54]. En la figura 3 se muestran los flujos de carbono entre las tres zonas de los ecosistemas terrestres donde también se incluye la fuente de HCF. Nótese que las flechas representan flujos de C en forma de CO_2 , con excepción de la flecha que va de la biomasa a la rizósfera, que es C orgánico (humus y biochar).

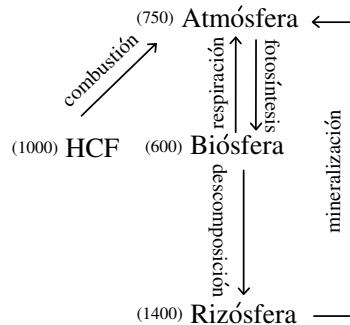


Figura 3: esquema de flujos de carbono en ecosistemas terrestres: Gton de C disponible en cada reservorio. No se incluye las reservas no-convencionales de HCF, ni la participación de los océanos

En este mismo respecto, se ha debatido que en el bosque amazónico hubo una participación humana hace más del mil años estableciéndose parcelas de suelo muy fértil, la “terra-preta” (del portugués ‘tierra negra’), similar a lo que sería un suelo inorgánico enriquecido artificialmente con biochar, a razón de unas 250 ton C/hectárea [55, 56, 57]. La terra-preta conserva su fertilidad durante muchos más ciclos de cultivo que los suelos fértiles comunes, y sin la necesidad del uso excesivo de fertilizantes químicos, lo cual es atribuido en parte al aumento de la capacidad de intercambio iónico y a la estabilización de sustancias húmicas que inhiben la mineralización y lixiviación [58, 59].

Sin embargo, el problema actual para sintetizar terra-preta en gran escala sería la necesidad de disponer de grandes cantidades de biomasa para preparar el agrichar requerido. Por ejemplo, si se parte de un suelo muy infértil, serían necesarias más de 500 Ton de madera por cada hectárea de terra-preta a sintetizar [60]. Una posible solución para ese problema podría ser la preparación de agrichar a partir de los HCF. Por ejemplo, en el caso particular de las grandes reservas de petróleo pesado de la faja bituminosa del Orinoco en Venezuela (reservas que probablemente caen dentro de la categoría de “no convencionales”); uno de los procesamientos más viables implica el uso de la pirólisis [61], con la cual se logra la transformación de ese petróleo pesado en petróleo liviano y abundante coque como sub-producto. Quedaría por investigar si el coque producto de los procesos de pirólisis de los HCF puede ser usado efectivamente como un agrichar. De manera metafórica, se estaría

sembrando los HCF para cosechar bioenergía, y paradójico también, el problema del calentamiento global pudiera ser solucionado por el mismo causante, ya que podría efectuarse la reversión de zonas desertificadas usando agrichar producto de HCF, e irrigación usando energía solar o eólica para desalinizar el agua de mar [62].

Los países en vías de desarrollo (desde el punto de vista económico y tecnológico) actualmente aumentan el consumo de su energía derivada de los HCF más rápidamente que los países altamente desarrollados, tal como queda implícito en la tabla 1 [42]. En vista del presente acaparamiento de las reservas de HCF, en particular las del petróleo, se torna cada vez más vigente la bioenergía como opción para el desarrollo en países no petroleros. En este caso, el aumento de la eficiencia agrícola (tercer parámetro en la tabla 1) sería el primer paso recomendable, con el fin de evitar la conversión de selvas tropicales y otros ecosistemas de abundante biodiversidad, en monocultivos de materia prima para biocombustibles.

Tabla 1: comparación entre un país muy desarrollado y otro poco desarrollado (desde el punto de vista económico–tecnológico)

Parámetro/año	Holanda	Etiopía
Consumo de energía (electricidad, transporte, etcétera) (Gcalorías/capita)	50	10
Consumo de alimentos* (en equivalentes de trigo) (Ton/capita)	0,8	0,2
Eficiencia agrícola (Ton trigo/hectárea)	10	2

*Relativo al costo y no a la cantidad del alimento

La reversión de zonas desertificadas en tierras fértiles o bosques, y el aumento del área de parques nacionales deberán ser temas prioritarios antes de implementar la bioenergía, para así evitar el llamado síndrome de Bambi [56] que hace ver todo desarrollo del trópico como catastrófico.

6 Conclusión

Luego de ciento cincuenta años del uso intensivo de combustibles líquidos estamos arribando a la encrucijada decisión de tomar con seriedad la ruta de las energías alternativas o tomar la ruta de los combustibles líquidos no convencionales. Cualquiera sea la respuesta, deberá enfocar hacia un mundo donde se pueda sustentar el consumo de energía sin perjudicar el medio ambiente.

Referencias

- [1] *The History of Steam Engines*, <http://inventors.about.com/library/inventors/blsteamengine.htm>, junio-2009. Referenciado en 13
- [2] *Steam locomotive*, http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_locomotive, junio-2009. Referenciado en 13
- [3] *How oil refining works*, <http://science.howstuffworks.com/oil-refining2.htm>, junio-2009. Referenciado en 13
- [4] *Cracking (chemistry)*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Cracking_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cracking_(chemistry)), junio-2009. Referenciado en 13
- [5] *The Story of Oil in Pennsylvania*, <http://www.priweb.org/ed/pgws/history/pennsylvania/pennsylvania.html>, junio-2009. Referenciado en 13
- [6] *Biocombustibles*, <http://www.gratisweb.com/palmaceite/biocombustibles.htm>, junio-2009. Referenciado en 13
- [7] *Internal combustion engine*, http://en.wikipedia.org/wiki/Internal_combustion_engine, junio-2009. Referenciado en 14
- [8] *Teoría del pico de Hubbert*, http://es.wikipedia.org/wiki/Curva_de_Hubbert, junio-2009. Referenciado en 14
- [9] *Oil depletion*, http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_depletion, junio-2009. Referenciado en 15
- [10] *Coal liquefaction*, http://en.wikipedia.org/wiki/Coal_liquefaction, junio-2009. Referenciado en 15
- [11] *Fischer—Tropsch process*, http://en.wikipedia.org/wiki/Fischer-Tropsch_process, junio-2009. Referenciado en 15

- [12] Arnulf Grubler, *Doing more with less: improving the environment through green engineering*. Environment, ISSN 0013-9157, **48**(2), 22-37 (2006). Referenciado en 16
- [13] *Methane clathrate*, http://en.wikipedia.org/wiki/Methane_clathrate, junio-2009. Referenciado en 16
- [14] *Synthetic fuel*, http://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic_fuel, junio-2009. Referenciado en 16
- [15] *Biomass to Liquids (BtL)*, <http://www.biofuelstp.eu/btl.html>, junio-2009. Referenciado en 16
- [16] *Shell in Qatar*, <http://www.shell.com/home/Framework?siteId=qatar>, junio-2009. Referenciado en 17
- [17] Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA). *Luminarias de investigación*, http://www.epa.gov/nrmrl/news/news_112008-s.html, junio-2009. Referenciado en 17
- [18] E. T. Wilkins. *Air pollution and the London fog of december 1952*. Journal of the Royal Sanitary Institute, ISSN 0370-7334, **74**(1), 1-21 (1954). Referenciado en 17
- [19] *Hydrodesulfurization*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrodesulfurization>, junio-2009. Referenciado en 17
- [20] B. Griffe and J. Laine. *Catalytic control of automotive emissions*. Acta científica venezolana, ISSN 001-5504, **38**, 13-33 (1987). Referenciado en 17
- [21] Sanhueza E. *Global and hemispheric changes in troposphere chemistry*. Interiencia, ISSN 0378-1844, **17**, 208-217 (1992). Referenciado en 17
- [22] *Lenntech: dióxido de carbono*, <http://www.lenntech.com/espanol/di%C3%B3xido%20de%20carbono.html>, junio-2009. Referenciado en 18
- [23] IPCC. *Climate change 2007, synthesis report*, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf, junio-2009. Referenciado en 18, 19
- [24] *Hockey stick controversy*, http://en.wikipedia.org/wiki/Hockey_stick_controversy, junio-2009. Referenciado en 18
- [25] National Research Council. *Surface Temperature Reconstructions for the last 2.000 years*, ISBN 0-309-66144-7, 2006. Referenciado en 18, 19, 20
- [26] *Carbon Credit*, http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_credit, junio-2009. Referenciado en 18

-
- [27] *Greenhouse effect*, http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect, junio-2009. Referenciado en 19
- [28] *Fuel cell*, http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell, junio-2009. Referenciado en 20
- [29] Klaus S. Lackner. *A guide to CO₂ sequestration*. Science, ISSN 0036-8075, **300**(5626), 1677-1678 (2003). Referenciado en 21
- [30] U. S. Department of energy. *FutureGen Clean Coal Project*, <http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/index.html>, junio-2009. Referenciado en 21
- [31] *CO₂ flooding*, http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_flooding, junio-2009. Referenciado en 21
- [32] Thomas D. Brown, Donald K. Harrison, J. Richard Jones and Kenneth A. LaSota. *Recovering coal bed methane from deep unmineable coal seams and carbon sequestration*. International Journal of Environment and Pollution, ISSN 0957-4352, **29**(4), 474-483 (2007). Referenciado en 21
- [33] *Photovoltaics*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>, junio-2009. Referenciado en 21
- [34] *The top 100. The world's largest power plants*, <http://www.industcards.com/top-100-pt-1.htm>, junio-2009. Referenciado en 21
- [35] *Fuel cell today*, <http://www.fuelcelltoday.com/index/>, junio-2009. Referenciado en 21
- [36] *Nuclear power in France*, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_in_France, junio-2009. Referenciado en 21
- [37] EERE Network News. *EIA: Wind Power Provided the Majority of Added Capacity in 2007*, 2009. Referenciado en 22
- [38] *Hybrid vehicle*, http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle, junio-2009. Referenciado en 22
- [39] *DOE: Bioenergy*. <http://www.energy.gov/energysources/bioenergy.htm>, junio-2009. Referenciado en 22
- [40] Eugenio Sanhueza. *Agroetanol: ¿un combustible ambientalmente amigable?* Inter ciencia, ISSN 0378-1844, **34**(2), 106-112 (2009). Referenciado en 23
- [41] Nextfuel. *De los criaderos ictícolas al biocombustible*, <http://www.biodiesel.com.ar/?p=969>, junio-2009. Referenciado en 23

- [42] Jorge Laine. *Los biocombustibles y la alimentación humana*. Interciencia, ISSN 0378-1844, **33**(1), 71-73 (2008). Referenciado en 23, 26
- [43] Sanderine Nonhebel. *Renewable energy and food supply: ¿will there be enough land?*. Renewable & sustainable energy review, ISSN 1364-0321, **9**(2), 191-201 (2005). Referenciado en 23
- [44] S. Yaman. *Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstock*, Energy Conversion and Management, ISSN 0196-8904, *21*, 651-671 (2004). Referenciado en 24
- [45] Johannes Lehmann. *Bio-energy in the black*. Frontiers in Ecology and the Environment, ISSN 1540-9295, **5**(7), 381-387 (2007). Referenciado en 24
- [46] Oil mallee association, *Integrated Wood Processing (IWP)*, http://oilmallee.org.au/wood_processing.html, junio-2009. Referenciado en 24
- [47] M. Ogawa. *Symbiosis of people and nature in the tropics*. Farming Japan, ISSN 0388-0303, **28**(5), 10-34 (1994). Referenciado en 24
- [48] J. Pietikäinen, O. Kiiikkilä and H. Fritze. *Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus*. Oikos, ISSN 0030-1299, **89**(2), 231-242 (2000). Referenciado en 24
- [49] Masahide Yamamoto et al. *Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia (Soil Fertility)*. Soil science & plant nutrition, ISSN 0038-0768, **52**(4), 489-495 (2006). Referenciado en 24
- [50] International Agrichar Initiative. Paul Blackwell et al. *Improving wheat production with deep banded Oil Mallee Charcoal in Western Australia*. <http://terrapreta.bioenergylists.org/taxonomy/term/30>, junio-2009. Referenciado en 24
- [51] Roger A. Sedjo. *Forests a tool to moderate global warming*. Environment, ISSN 0013-9157, **31**(1), 14-20 (1989). Referenciado en 24
- [52] Johannes Lehmann, John Gaunt and Marco Rondon. *Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review*. Mitigation and adaptation strategies for global change, ISSN 1573-1596, **11**, 403-427 (2006). Referenciado en 24
- [53] *Carbon cycle*, http://www.cotf.edu/ete/modules/carbon/effig11_full.html, junio-2009. Referenciado en 24
- [54] Chih-Hsin Cheng, Johannes Lehmann, Janice E. Thies and Sarah D. Burton. *Stability of black carbon in soils across a climatic gradient*. Journal of Geophysical Research, ISSN 0148-0277, **113**(G2), 1-13 (2008). Referenciado en 24

-
- [55] Bruno Glaser, Ludwig Haumaier, Georg Guggenberger and Wolfgang Zech. *The terra preta phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics*, doi 10.1007/s001140000193. *Naturwissenschaften*, ISSN 0028–1042, **88**, 37–41 (2001). Referenciado en 25
- [56] Charles C. Mann. *The real dirt on rainforest fertility*, doi 10.1126/science.297.5583.920. *Science*, ISSN 0036–8075, **297**(5583), 920–923 (2002). Referenciado en 25, 26
- [57] Emma Marris. *Putting the carbon back: Black is the new green*, doi:10.1038/442624a. *Nature*, ISSN 0028–0836, **442**, 624–626 (2006). Referenciado en 25
- [58] B. Liang et al. *Black carbon increases cation exchange capacity in soils*, doi 10.2136/sssaj2005.0383. *Soil Science Society of America*, ISSN 0361–5995, **70**, 1719–1730 (2006). Referenciado en 25
- [59] Ray O’Grady and Rod Rush. *The terra preta phenomenon*. Managing the carbon cycle, Katanning workshop, 21–22 March 2007. Referenciado en 25
- [60] Jorge Laine. *Sowing fossil hydrocarbons to promote bioenergy*, *Energieia*, **20**(2), 1–3 (2009). Referenciado en 25
- [61] Jorge Laine and David L. Trimm. *Conversion of heavy oils into more desirable feedstocks*, doi 10.1002/jctb.5030320719. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, ISSN 0268–2575, **32**(7–12), 813–833 (2007). Referenciado en 25
- [62] Ali Al-Karaghoul, David Rennea and Lawrence L. Kazmerski. *Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions*, doi:10.1016/j.rser.2008.05.007. *Renewable and sustainable energy reviews*, ISSN 1364–0321, **13**(9), 2397–2407 (2009). Referenciado en 26