

COMBUSTIBLES ALTERNOS

Hernando Romero Paredes R., Juan José Ambriz G

Área de Ingeniería en Recursos Energéticos

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

A.P. 55-534, 09340, México D.F. Tel. (52) 5804-4644 y 45 Fax (52) 5804-4900,

Correo electrónico; hrp@xanum.uam.mx;

INTRODUCCIÓN.

En la definición y descripción de combustibles alternos nos debemos centrar en aquellas alternativas tecnológicas que permitan obtener compuestos que difieren de los tradicionales, al menos en sus formas de ser obtenidos. Al hablar de un compuesto combustible tendremos que enfocarnos en aquellos que son conocidos como tales; la raíz de todos los combustibles son los elementos químicos carbón, hidrógeno y azufre. De aquí que los combustibles, alternos o no, tienen que tener uno o más de estos elementos que, junto con otros elementos no combustibles, forman lo que se llama un compuesto combustible. La composición y su estructura molecular definen sus propiedades como tales; sólidos, líquidos, gaseosos, densidad, viscosidad, punto de ignición, temperatura y velocidad de flama, poder calorífico, etc.

La búsqueda de combustibles alternos no es nueva, sino que fue el inicio del uso de combustibles diferentes a la biomasa como leña y el carbón mineral. Los combustibles sintéticos líquidos y gaseosos son obtenidos regularmente a partir de compuestos carbonosos. Los compuestos más socorridos para este propósito han sido el carbón mineral y el aceite de piedra. Este último caracterizado por la presencia de kerógeno; materia orgánica con elevado peso molecular prácticamente insoluble en la mayoría de los solventes y no es considerado miembro de la familia del petróleo. La materia orgánica que lo conforma tiene una fracción del llamado betumen o material bituminoso, el cual es un hidrocarburo.

La conversión de estos materiales para la obtención de combustibles sintéticos tiene por objeto hacer frente a la deficiencia de

combustibles derivados del petróleo e intentar conseguir uno con mejores características y menos dañino al medio ambiente. La biomasa, material derivado directa o indirectamente de vegetales o animales y considerado como renovable, puede ser convertida en combustibles sintéticos con características excepcionales: la producción del alcohol mediante la fermentación de granos es un ejemplo clásico en este tema. Sin embargo en el contexto económico donde los granos vegetales, usados como productos alimenticios, tienen un mayor valor como nutrimento para el ser humano.

En este artículo se pretende dar un panorama de los combustibles alternos a los convencionales derivados del petróleo y que permita tener una idea clara sobre las tendencias de la investigación moderna y los desarrollos tecnológicos que puedan ser implementados en el corto plazo. No se pretende abarcar todas las tendencias y desarrollos del mundo actual, sino aquellas que pueden impactar en un plazo relativamente corto, acordes con la vida media de los combustibles convencionales. Sin embargo la mayor parte de los principios de conversión son aplicables al espectro de materiales carbonaceos o celulósicos los cuales se encuentran en la naturaleza, se cultivan o son desperdicios de origen orgánico.

Así se abordará de manera sucesiva las conversiones físicas, químicas y biológicas que pueden tener lugar en un proceso de producción de un combustible alternativo o mismo su uso directo como lo sería el quemar basura derivada de los bosques.

ANTECEDENTES

La producción de gas de carbón fue práctica común en el siglo XIX. Hacia el año de 1792 el ingeniero escocés Murdoch (Shnidman, 1945) destiló carbón en una retorta construida en hierro y obtuvo un gas que desde entonces se le llamó gas de carbón. Con él iluminó su casa. Más tarde, ya a principios del siguiente siglo, en Londres se usaba para la iluminación municipal, la cual fue muy rápidamente usada en la mayor parte de Europa y otras ciudades importantes del mundo. Este gas, tal como fue usado, contenía sustancias perniciosas y tóxicas. Pero pronto se desarrollaron técnicas para su limpieza y purificación. Hacia finales de ese siglo, el gas de carbón tomó gran relevancia en la iluminación de los hogares, sin embargo su uso como fuente calorífica para las casas e industria llegó más tarde aunque representó gran importancia. El gas de carbón, tal como se distribuía, contenía un 50% de hidrógeno, derivado del 20 o 30 % del metano, y el resto era monóxido de carbón. Su poder calorífico se situaba en el orden de 19 MJ/m^3 . El llamado gas azul, derivado de hacer pasar vapor de agua sobre carbón incandescente, está formado por 50% de hidrógeno, 40% de monóxido de carbono y la parte remanente como bióxido de carbono y nitrógeno. Su poder calorífico ronda los 11 MJ/m^3 (Morgan, 1945).

Hacia principios del siglo XX la disponibilidad de gas natural, con un poder calorífico superior a los 37 MJ/m^3 comenzó a desplazar el uso de gas producido con las técnicas anteriores. El uso de gas natural fue creciendo al ritmo de crecimiento de los descubrimientos de los yacimientos de ese energético a precios más accesibles. Sin embargo a raíz del embargo petrolero de los países Árabes en el año de 1973, los países productores de carbón regresaron su vista hacia la tecnología de la gasificación del carbón.

Este proceso consiste en la destrucción total del carbón en gasificadores específicos como el Lurgi a presión, o el Koppers-Totzeck que opera con carbón pulverizado. A partir del gas bruto se prepara el gas de síntesis ($\text{CO} + 2\text{H}_2$), con el cual se realiza catalíticamente la síntesis Fischer-Tropsch a 200°C y a diferentes presiones de trabajo según se

desea enfatizar la obtención de hidrocarburos o de productos químicos oxigenados como alcoholes, ácidos, ésteres, éteres, aldehídos o cetonas. También por esta vía mediante la reforma con vapor de parte del CO_2 se obtiene el gas de partida ($\text{CO} + 3\text{H}_2$) para la elaboración del gas natural sintético o "syngas" (metano).

Las firmas Hydrocarbon Research (1949) de los Estados Unidos y Lurgi-Rhurchemie (1950,1954) de Alemania, aplicaron este procedimiento al carbón, principalmente del manto Dorotea.

La licuefacción del carbón tiene una historia más corta, pues data de los años 1912 (Storch, 1945; Berkowitz, 1979). Friedrich Bergius, en Alemania, trabajó durante muchos años en este proceso el cual le dio a ganar el premio Nobel de química en 1931, al producir combustibles líquidos mediante la hidrogenación del carbón a temperaturas y presiones elevadas. Para 1935 la producción de combustibles líquidos a partir de la hidrogenación del carbón era una práctica común en diferentes países europeos. Las plantas de licuefacción de gas pronto llegaron a ser comerciales para llegar a producir hasta 4.2 millones de toneladas al año, equivalentes a 16 millones de litros diarios de gasolina equivalente (Donath, 1963). Posterior a la segunda guerra mundial esas plantas se convirtieron en poco rentables derivado de la explotación masiva del petróleo y sus derivados que han sido más económicos. La hidrogenación del carbón no ha perdido, sin embargo, interés en su desarrollo, principalmente en los países desarrollados. La mayoría de los desarrollos han apuntado hacia la operación de plantas a más bajas presiones y temperaturas, a las originalmente propuestas por Friedrich Bergius. Las unidades alemanas operan entre 25 a 70 Mpa y temperaturas que van de 450 a 500°C . Las más modernas unidades desarrolladas en Estados Unidos trabajan a presiones entre 10 y 20 Mpa y temperaturas del mismo orden.

El principal método de licuefacción directa es haciendo reaccionar el monóxido de carbono con hidrógeno en presencia de un catalizador para formar hidrocarburos líquidos a temperatura ambiente. Este procesos de

síntesis de hidrocarburos se basa en el trabajo de Fischer – Tropsch realizado en los años 1920's (Bercowitz, 1979, Storch, 1945).

La energía solar fotosintetizada por las plantas es una energía que ha sido utilizada por el hombre desde prácticamente sus orígenes, sin embargo el enfoque de un combustible alternativo comienza a tomar importancia en el siglo XIX luego de la proliferación de los campos de cultivo de la caña de azúcar. También la producción de metano y monóxido de carbono derivado de la fermentación del heno o la paja fue una práctica común, aunque arcaica, ya que se hacía de manera poco controlada y con eficiencias extremadamente bajas.

Se retomó el proceso de gasificación del carbón para aplicarlo a la paja, sin embargo resultó poco económico, derivado de la facilidad de la combustión directa que no representaba grandes costos para efectuarla. En grandes instalaciones la gasificación de la paja se vuelve una técnica conveniente debido a la factibilidad de generar pequeñas redes de distribución del gas así producido. En algunos estados africanos, la recolección de residuos agrícolas es una vieja costumbre. En Costa de Marfil, por ejemplo, se instaló una planta de gasificación de los residuos del coco.

El alcohol producido por la fermentación de productos azucarados es una técnica suficientemente conocida y que en las últimas décadas ha tomado gran relevancia. De acuerdo con un estudio hecho a principios de los años de 1970, realizado por las sociedades francesas Bertin, Ugine Kulhmann y ELF, para producir 2 millones de metros cúbicos de alcohol se requerirían 510,000 hectáreas de remolacha, 1.25 millones de hectáreas de trigo, o 720,000 hectáreas de papas. Las tecnologías empleadas para la producción de alcohol a partir de productos celulósicos comprende tres etapas: hidrólisis de la celulosa, recuperación y neutralización del jugo azucarado ácido y su fermentación alcohólica y finalmente su destilación. La hidrólisis mediante el método de Bergius, que se basa en una reacción ácida con ácido clorhídrico concentrado y frío, permite obtener las tasas más altas de producción; 135 litros por tonelada de paja, que con otros procesos.

Desde el punto de vista económico, no ha sido completamente satisfactorio. La producción de combustibles a partir de la biomasa hoy en día toma el nombre de bioenergía y al combustible resultante se le denomina biocombustible.

La producción de combustibles alternos ha sido y sigue siendo una inquietud que a mueve a las diferentes naciones industrializadas a buscar las diferentes alternativas que puedan hacer frente a la incertidumbre y a la vulnerabilidad de aprovisionamiento de combustibles derivados del petróleo. En la sección siguiente se hará una revisión de los combustibles alternos, comenzando por una clasificación y su desarrollo acorde con las tecnologías empleadas.

CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS.

La siguiente clasificación es una propuesta basada en los diferentes procesos y tecnologías en la producción y uso de combustibles no convencionales reportados en la literatura. Esto último no implica el que un combustible alternativo no pueda ser producido a partir de un combustible convencional v.g. gas de síntesis.

En la tabla 1^a, B y C se presenta una clasificación de estos combustibles, su origen, los principales procesos de producción y el tipo de combustible producido así como el grado de su poder calorífico.

De acuerdo con la tabla 1 A, B y C los combustibles alternos son finalmente derivados hidrocarburos o carbohidratos, como se les desee llamar según su origen, y en casos particulares es el agua misma. Se puede observar que una clasificación basada en primer lugar en materiales residuales industriales, que si bien su origen puede ser mineral o vegetal, son compuestos procesados y ahora residuales de una cadena productiva. Después se encuentran los materiales minerales naturales; carbón en cualquiera de sus calidades, arena de alquitrán y esquistos bituminosos, que a través de diversos procesos de transformación se obtienen combustibles gaseosos, líquidos y algunos residuos sólidos

no combustibles. Finalmente se tienen los biocombustibles derivados de algún proceso térmico, químico, biológico o alguna combinación de estos, a partir de la biomasa. Los combustibles así obtenidos son

PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y/O USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS.

Introducción.

Como se ha podido observar en la tabla 1, los procesos de producción son variados y dependientes del tipo de materia prima utilizada para la producción del combustible deseado. En este apartado se desarrollarán los procesos genéricos sin entrar en detalles particulares. Cada proceso tiene sus

principalmente gaseosos y líquidos, aunque también se llegan a obtener materiales sólidos no combustibles. En el inciso siguiente se abordarán, de manera no exhaustiva, cada uno de esos procesos. particularidades y peculiaridades. Cada uno a su vez son modificables en función del tipo de combustible que se desee obtener en proporción mayoritaria. Se debe señalar, honestamente, que no se describen todos los procesos existentes, sino aquellos más relevantes y que se han venido utilizando en los últimos años.

Derivado que son las plantas cementeras fundamentalmente quienes usan algunos de los combustibles residuales para su proceso de clinkerización se describirá únicamente los combustibles usados y algunos de los efectos sobre la salud y el medio ambiente.

Tabla 1 A Combustibles naturales de origen mineral

Clasificación	Origen	Procesos	Combustible obtenido	Poder calorífico
Carbón	Mineral	Gasificación e hidrogenación indirecta con vapor de agua en presencia de aire	Gas de síntesis; CO, H ₂	Bajo
		Gasificación e hidrogenación indirecta vapor de agua en presencia de oxígeno	Gas de síntesis; CO, H ₂	Medio
		Gasificación e hidrogenación indirecta vapor de agua en presencia de oxígeno y metanación	CO, H ₂ , CH ₄	Medio alto
		Hidrogasificación: Gasificación e hidrogenación directa con suministro de hidrógeno	CO, H ₂ , CH ₄	Alto
		Gasificación catalítica con alimentación de vapor de agua, purificación con reflujo y separación criogénica	CO, H ₂ , CH ₄	Alto
		Gasificación / licuefacción	CO, H ₂	Medio
Arena de alquitrán	Mineral	Gasificación / licuefacción	CO, H ₂	Medio
Esquistos bituminosos		Gasificación / licuefacción	CO, H ₂	Medio
		Gasificación e hidrogenación indirecta vapor de agua en presencia de oxígeno	Gas de síntesis; CO, H ₂	Medio
		Pirólisis directa	CO, H ₂ , CH ₄	Medio alto
Gas natural	Pozo natural	Reformación	H ₂	Alto
Agua	Natural	Termoquímico; electroquímico	H ₂	Alto

Tabla 1 B. Combustibles alternos de origen vegetal o animal (bio combustibles)

Clasificación	Origen	Procesos	Combustible obtenido	Poder calorífico
Biomasa	Vegetal	Termoquímico	combustión directa	Medio bajo
		Gasificación	Gas de síntesis; CO, H ₂	Medio
		Gasificación, enriquecimiento y síntesis	Gas de síntesis; CO, H ₂ ; Metanol; diesel Fisher – Tropsch	Medio alto
		Pirólisis directa	Gas de síntesis; CO, H ₂ , CH ₄ , líquidos de alquitrán, otros	Medio
		fermentación	Etanol	Alto
		Digestión anaeróbica	CO ₂ , H ₂ , CH ₄	Medio
		Digestión anaeróbica y enriquecimiento	CO, H ₂ , CH ₄	Alto
		Fotoquímico	H ₂	Alto
	animal	Pirólisis	Gas de síntesis; CO, H ₂ y aceites orgánicos	Medio alto
	Vegetal y/o animal	Depolimerización térmica	Gas de síntesis; CO, H ₂ ; etanol, metanol; biodiesel Fisher – Tropsch	Alto

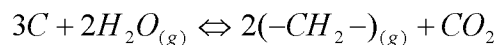
Combustibles naturales de origen mineral

Los combustibles alternos de origen mineral son quizá los más frecuentemente sintetizados y las rutas de los procesos empleados son normalmente la gasificación, la hidrólisis, hidrogenación, licuefacción directa, la pirólisis, el craking térmico o catalítico y la depolimerización. En este trabajo no se pretende dar una explicación exhaustiva de esos procesos, pero se tratarán de manera que pueda comprenderse con mayor facilidad.

Carbón, agua y aire son la materia prima de inicio de todos ellos. El carbón provee de 395 kJ/mol de energía térmica o 6.7 moles de vapor a 700 K. Se considera, además que el calor recuperado de los gases producto de la combustión del carbón se restringe al 80% del calor de condensación, al equilibrio. Esto es equivalente a la recuperación del 80% del

calor de reacción de las reacciones de síntesis. La energía requerida para la compresión separación, etc, no se considera en el balance. Las reacciones que se llevan a cabo en los diferentes procesos se describen a continuación:

Licuefacción directa con alimentación de vapor.



$$\Delta H_{1500}^o = +67.9 \text{ kJ}; \quad k_{1500} = 1.19 \times 10^{-6}$$

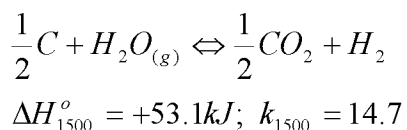
De esta ecuación se desprende que no es nada favorable, de acuerdo con la constante de equilibrio, para su realización. Por lo que se debe llevar a cabo a temperaturas muy elevadas.

Tabla 1 C. Combustibles alternos derivados de residuos industriales

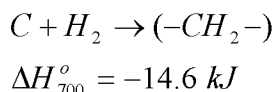
Clasificación	Origen	Procesos	Combustible obtenido	Poder calorífico
Residuo sólido	Llantas de desecho	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Bajo
	Cascos de baterías	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Bajo
	Tierras contaminadas	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Bajo
	Trapos y papel contaminado	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Bajo
	Plásticos	Gasificación	Gas de síntesis; CO, H ₂	Medio
		Pirolisis	Gas de síntesis; CO, H ₂	Medio
		De polimerización	Gas de síntesis; CO, H ₂	Medio
Residuos líquidos	Disolventes	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Medio
	Grasas	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Medio
	Aceites usados	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Medio
	Residuos de la destilación del petróleo	Incineración en horno cementero	Combustión directa	Medio alto
	Lodos de destilación	Incineración en horno cementero	Combustión directa	bajo

Licuefacción directa con alimentación de hidrógeno.

El hidrógeno puede ser obtenido en un gasificador de acuerdo con la reacción:

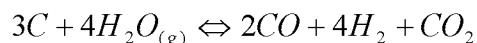


El hidrógeno así obtenido reacciona con el carbón en un reactor con reciclado, para obtener:



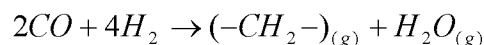
Licuefacción indirecta Fischer-Tropsch

La obtención de un gas de síntesis con una relación H₂/CO = 2, se produce primero en un gasificador:



$$\Delta H_{1500}^{\circ} = +374.9 kJ; k_{1500} = 7.7 \times 10^7$$

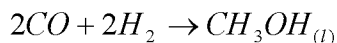
Entonces, el gas de síntesis se hace reaccionar en un reactor catalítico con perlas de Fe, del cual se obtiene el combustible y vapor de agua:



$$\Delta H_{700}^{\circ} = -149.7 kJ$$

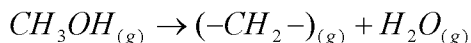
Licuefacción indirecta vía conversión a metanol

Un gas de síntesis con relación H₂/CO = 2, de acuerdo con la tercera reacción mostrada, se hace reaccionar de suerte de generar metanol hasta el consumo total de los reactantes:



$$\Delta H_{700}^{\circ} = -101.9 \text{ kJ}$$

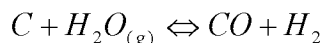
El metanol así obtenido puede ser convertido a gasolina mediante una reacción catalítica con zeolita ZSM - 5:



$$\Delta H_{700}^{\circ} = -47.3 \text{ kJ}$$

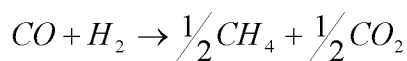
Producción de metano

Se produce en un gasificador gas de síntesis con una relación H_2/CO baja, de acuerdo con la reacción:



$$\Delta H_{1500}^{\circ} = +134.4 \text{ kJ}; \quad k_{1500} = 594$$

Posteriormente, ese gas se hace reaccionar con catalizador de Fe para formar metano, en un reactor con reciclado para agotar todos los reactivos:



$$\Delta H_{700}^{\circ} = -129.2 \text{ kJ}$$

El metano también puede ser producido mediante una reacción del gas de síntesis con 1 mol de CO y 3 de hidrógeno, con un catalizador de níquel para formar el metano de acuerdo con una ecuación similar a la anterior, solamente la entalpía de reacción será de -220.4 kJ . De estas rutas tecnológicas que consume menor energía por mol de producto resulta ser la licuefacción directa usando hidrógeno.

De este conjunto de procesos reactivos factibles para la obtención de un combustible alterno, los procesos involucrados implican la gasificación, la pirólisis y la depolimerización térmica.

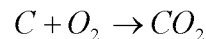
Con objeto de aclarar estos procesos se detallarán en seguida:

Gasificación

La gasificación es la conversión de un sólido o un líquido en un gas. Aunque esta conversión puede ser con un proceso físico,

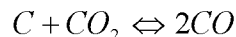
en este trabajo involucra también a los procesos químicos. La gasificación, por ejemplo, del carbón, se refiere al conjunto de procesos involucrados al convertir el carbón en productos gaseosos, entre los cuales se incluye la pirólisis que se describirá más adelante. En seguida se presentan el conjunto de reacciones involucradas en la gasificación.

1. Oxigenólisis. En esta reacción se presenta en dos etapas: la producción de monóxido de carbono y la de dióxido de carbono. Este es un proceso de combustión controlado en una atmósfera de oxígeno. Gran parte del oxígeno alimentado al gasificador, como oxígeno puro o aire, es usado en la primera etapa o zona de combustión que aporta el calor necesario para la conversión:



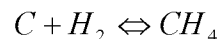
$$\Delta H_{298}^{\circ} = -393.5 \text{ kJ / mol}$$

Una vez que reacciona el oxígeno alimentado, el carbón se encuentra a elevadas temperaturas en una atmósfera de CO_2 , lo cual lleva a la reacción de Boudouard:



$$\Delta H_{298}^{\circ} = +172.5 \text{ kJ / mol}$$

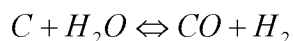
2. Hidrogenólisis. Este proceso permite obtener metano mediante la reacción catalítica del carbono con hidrógeno:



$$\Delta H_{298}^{\circ} = -74.8 \text{ kJ / mol}$$

El hidrógeno, también reacciona con el nitrógeno y el azufre, que junto con el carbón, se obtiene amoníaco y ácido sulfhídrico. Ya que la relación hidrógeno – carbón en los productos gaseosos es más elevado que con carbón solo, se requiere añadir al sistema hidrógeno. Este es añadido a la reacción, normalmente, como agua.

3. Hidrólisis. La hidrólisis es la reacción del carbón con agua. Normalmente el agua es alimentada al reactor en forma de vapor. La reacción típica, bajo las condiciones del gasificador, es la reacción endotérmica de formación del monóxido de carbono e hidrógeno:



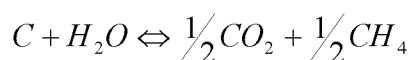
$$\Delta H_{298}^{\circ} = +131.3 \text{ kJ/mol}$$

El agua, y más específico el vapor del agua, provee del oxígeno para la combustión y el hidrógeno, y bajo ciertas condiciones de operación se puede obtener directamente el bióxido de carbono:



$$\Delta H_{298}^{\circ} = +90.1 \text{ kJ/mol}$$

o bien:



$$\Delta H_{298}^{\circ} = +7.7 \text{ kJ/mol}$$

Estas dos ecuaciones son endotérmicas, esto es, consumen una cantidad de calor, para efectuar la conversión del carbono a bióxido de carbono. Consecuentemente, el oxígeno alimentado al gasificador para suministrar la energía requerida, no debe ser combinado con agua.

Se puede establecer un sinnúmero de ecuaciones factibles entre el carbón, el hidrógeno, además del oxígeno y agua, con el riesgo de presentar un panorama muy confuso y con bases muy pobres. Para ello se establecen los diagramas de equilibrio de los procesos de gasificación, en función de la presión, la temperatura, y las especies reactivas presentes. Los gasificadores son comúnmente operados a temperaturas entre 800 y 1500 K, de esta manera las especies, que de acuerdo con su diagrama de equilibrio, pueden estar presentes son el monóxido de carbono, bióxido de carbono, hidrógeno, metano y agua.

Pirolisis.

La pirolisis se refiere a descomposición de la materia orgánica, mediante calor en ausencia de aire. También se le llama descomposición térmica. Cualquier materia orgánica que se piroliza, se obtiene materia orgánica rica en hidrógeno y los residuos sólidos obtenidos son ricos en carbono. Este proceso produce generalmente combustibles líquidos a partir de compuestos carbonados. Más aún, como la gasificación y la licuefacción son procesos que se llevan a cabo a temperaturas elevadas, la pirolisis es generalmente la primera etapa del proceso de conversión.

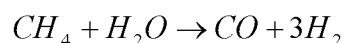
Quizás uno de los procesos de pirolisis mejor estudiados es el cracking del petróleo. Hay que recordar que el cracking es el rompimiento térmico de grandes moléculas en otras pequeñas. La temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso afecta en la cantidad y composición de la materia volátil. Cuando la materia prima es calentada lentamente evoluciona rápidamente hacia productos volátiles cerca de los 350 a 400 oC, pero cae rápidamente hacia los 500 oC. Este es el estado llamado de descomposición térmica activa. Hay tres estados principales en el proceso de la pirolisis. En el primero, arriba de los 100 oC pero debajo de los 300 oC, la evolución a materia volátil no es grande y los productos son generalmente compuestos de óxidos de carbono y agua. En la segunda etapa de descomposición activa, se obtiene cerca del 75% de la materia volátil. En una tercera etapa, que se define fundamentalmente para el carbón, se presenta una desgasificación asociada con la transformación del carbono y acompañada por el desprendimiento de gases no condensables, principalmente hidrógeno.

Reformación

La reformación es un proceso químico usado más frecuentemente en las refinerías de petróleo y como una etapa en procesos de síntesis de combustibles. De manera diferente a como se lleva el proceso de cracking, en éste la masa molar no se altera de manera significativa, pero la estructura molecular es manipulada para obtener productos de mayor calidad. La reformación frecuentemente involucra la deshidrogenación para disminuir el estado de saturación, como es el caso de la producción de aromáticos a partir de naftenos y olefinas.

a partir de parafinas. En la reformación isomérica, una parafina normal se convierte en un compuesto iso- sin cambios en los estados de saturación. Normalmente estas reacciones sirven para establecer el número de octanos en las gasolinas.

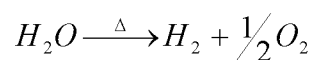
Como uno de los productos que regularmente se desea obtener es el hidrógeno, su obtención se basa en la reformación catalítica del gas natural, usando níquel como catalizador y llevada a cabo a temperaturas elevadas, normalmente en hornos a fuego directo, cuya reacción es:



Esta reacción es la inversa del proceso de metanación descrito anteriormente. En la práctica la eficiencia de producción de hidrógeno a partir del metano es del 70%.

Producción directa de hidrógeno

La producción de hidrógeno tiene muchos derroteros. La reformación descrita en el párrafo anterior es una de las más comunes en el medio industrial, sin embargo existen muchas otras formas de obtenerlo. Desde las reacciones convencionales de la disociación del agua vía termólisis o electrólisis, hasta aquellas en las que se involucran diversos y muy variados compuestos químicos. Sin embargo, su obtención a partir del agua es una ruta por demás interesante. La termólisis de agua nos lleva directamente a la reacción:

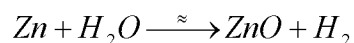
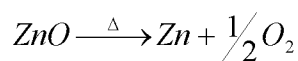


La cual se lleva a cabo a una temperatura cercana a los 4300 oC.

La electrólisis del agua es un proceso mucho más frecuentemente usado para la producción de hidrógeno. Prácticamente todas las empresas dedicadas a la distribución y venta de hidrógeno, lo obtienen a partir de este proceso.

Sin embargo resulta interesante el obtener el hidrógeno a partir de reacciones químicas cuya sumatoria es la disociación del agua y cuyos niveles de temperatura y/o de consumo de energía eléctrica es menor a los dos procesos anteriores. Aunque la suma de la energía involucrada es, estrictamente

hablando, la misma. El proceso se puede representar de manera sencilla con la siguiente reacción:

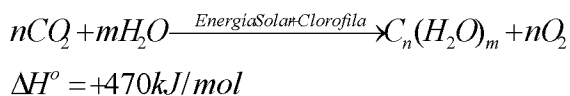


De este tipo de reacciones se pueden establecer un número elevado empleando igual número de compuestos químicos. En la literatura se tiene reportado alrededor de 200 reacciones diferentes. Naturalmente que habrá que buscar aquellas que cumplan con la condición del manejo del menor número de reacciones y de materiales y el empleo de las más bajas temperaturas posibles y/o el consumo menor de electricidad, en el caso que existan etapas electrolíticas.

Combustibles alternos de origen vegetal o animal.

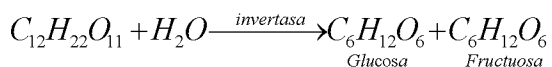
Los combustibles que se obtienen de origen vegetal o animal se les ha llamado biocombustibles, y la materia prima para su obtención es la biomasa. En esencia la biomasa es toda aquella materia orgánica derivada de plantas o animales sobre la base de ser renovables. Entre estos se deben mencionar aquellos cultivos específicos que se realizan con fines energéticos. Tal es el caso de granos para la producción de aceites combustibles, árboles de crecimiento rápido, celulósicos y no considerados como maderas preciosas, frutas y vegetales comestibles, así como los desechos derivados de la actividad agrícola, ganadera y silvícola. En esta clasificación también se consideran las plantas acuáticas y los desechos derivados de la actividad humana; desechos municipales.

Así como los combustibles convencionales, la energía de la biomasa está íntimamente asociada con el contenido de átomos carbón e hidrógeno en moléculas oxidables. La fuente de carbón e hidrógeno para estos materiales es el bióxido de carbono y el agua respectivamente. Esta conversión se lleva a cabo en el proceso denominado fotosíntesis. Los dos ingredientes importantes en la transformación es la energía solar y la clorofila. La fotosíntesis puede ser representada por la reacción global siguiente:



$C_n(H_2O)_m$ representa la clase de compuestos orgánicos denominados carbohidratos. Las plantas, típicamente contienen entre 0.1 a 0.3% de la energía solar incidente original, la cual es una medida de la máxima cantidad de energía recuperable de la planta si ésta se convierte en un combustible sintético. La materia orgánica oxidable que es producida por la fotosíntesis, relevante en la conversión energética, son los carbohidratos y la lignina. Todos los carbohidratos presentes son sacáridos. Uno de los polímeros más conocidos es la sucrosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$, la glucosa, $C_6H_{12}O_6$. Esta formulación también representa a la manosa y la fructuosa.

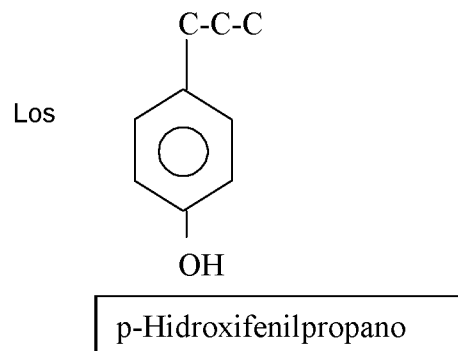
La propiedad más relevante de los azúcares, en los procesos de conversión de la biomasa, es tal vez si son o no fermentables. Los azúcares fermentables son: D-glucosa, D-manosa, D-fructuosa, D-galactosa y la maltosa. Otros azúcares pueden convertirse en fermentables a partir de la hidrólisis, usualmente en medio ácido o mediante enzimas. Por ejemplo la sucrosa, que es la combinación de dos azúcares, es hidrolizada por la enzima invertasa:



Una vez que la sucrosa es hidrolizada, los azúcares resultantes son fermentables, para poder producir etanol. Los otros carbohidratos presentes en la biomasa son la celulosa y la hemicelulosa. Estos son polímeros de azúcares y se les denomina polisacáridos. La lignina es también un importante constituyente de la biomasa. Éste no es un carbohidrato, pues está formado de un polímero sencillo de benceno ligado con cadenas alifáticas. El p-hidroxifenilpropano es un compuesto fenólico y un importante monómero de la lignina.

Los posibles procesos potenciales para la conversión de la biomasa en combustibles sintéticos son la conversión bioquímica mediante el proceso de fermentación y la digestión anaerobia, los procesos

termoquímicos pirolisis y gasificación y el proceso directo de combustión. La fermentación produce mayoritariamente combustibles líquidos; alcohol etílico. La pirolisis produce tanto líquidos como gaseosos y la gasificación y la digestión anaerobia produce combustibles gaseosos.



procesos térmicos de gasificación y pirolisis descritos arriba, son el medio más efectivo para recuperar o convertir el contenido energético de la biomasa. La madera contiene 80% o más de materia orgánica volátil que puede ser recuperada como gas mediante la pirolisis. Los gases obtenidos mediante este proceso son esencialmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono. La gasificación de la madera puede ser usada para la producción de combustibles gaseosos de medio y bajo poder calorífico o bien gas de síntesis que puede ser convertido a combustibles líquidos usando uno de los procesos indirectos de licuefacción, previamente descritos.

La combustión de la biomasa, por supuesto, es una de las rutas más directas para la recuperación de la energía, y es un medio efectivo para utilizar el total de la energía contenida en la madera y otros productos vegetales.

La producción masiva de cultivo de árboles para la generación eléctrica es una idea que ha sido hecha realidad en diferentes partes del mundo. Los cultivos energéticos; árboles, pastos y arbustos, son realizados para operar plantas de generación eléctrica utilizando superficies que no habían sido usadas para otro tipo de cultivos de consumo humano. Las dendroeléctricas de Alemania, Japón y Filipinas, son ejemplos vivientes de lo que es posible hacer. Tecnológicamente hablando, la combustión a pequeña escala

es factible. La operación a mayor escala para la generación eléctrica entre 5 y 50 MW es también factible, aunque tal vez no sea competitiva con tecnologías convencionales derivadas del petróleo. Debido a la gran extensión de terreno requerido para las plantaciones, la naturaleza estacional de la producción y el gran volumen de materia que debe ser transportada y almacenada, la factibilidad de una planta a base de madera puede presentar grandes problemas. Una planta de generación de 60 MW pudiera requerir 1000 toneladas diarias de madera seca, provista a partir de una superficie de entre 400 y 800 kilómetros cuadrados de intenso trabajo forestal.

Los granos en general son otra fuente atractiva para la producción de vectores energéticos. Entre estos destacan el maíz, trigo, arroz y otros cereales, quienes tienen la facilidad de ser hidrolizadas, para luego fermentar los azúcares para la producción de etanol. Los cultivos de especies específicas para la producción de azúcar; caña de azúcar, remolacha, betabel, etc., Sin embargo la caña de azúcar está limitada a las zonas de clima cálido y requiere tanto de buena calidad del terreno como de irrigación. El betabel y la remolacha producen solamente 40% de azúcar fermentable de lo que produce la caña de azúcar por área de cultivo.

La factibilidad de los cultivos de cereales y granos para la producción de aceites combustibles es elevada. No obstante aún no se ha podido establecer un cultivo específico que sea rentable y que provea de los requerimientos energéticos de manera económica.

Los residuos animales, como una fuente energética, tiene la ventaja de que no compite con otros usos. En estos casos los procesos tecnológicos aplicables son la pirolisis, la depolimerización térmica y la digestión anaerobia para la producción de metano son las más apropiadas.

Los desechos agrícolas, forestales y municipales son una fuente de biomasa energética cuyo costo es nulo. Ciertamente algunos de estos desechos están mejor cotizados en un mercado de producción de

alimento para ganado o bien como materia prima para otros procesos, como es el caso del bagazo de caña, utilizado para la producción de papel por su contenido de celulosa o bien es quemado en las propias calderas de los ingenios azucareros.

Los desechos agrícolas aptos para su uso como energéticos pueden ser procesados con las mismas tecnologías definidas para los desperdicios o residuos animales. De esta manera la pirolisis, la depolimerización térmica y la digestión anaerobia son los procesos más prometedores. La pirolisis ha sido exhaustivamente explicada, sin embargo se presenta un caso de estudio.

Romero – Paredes et al, (1984), desarrollaron un conjunto de experiencias en un horno solar para la pirolisis del olote y desechos forestales de bosques de pino. La pirolisis se efectuó en un reactor solar de lecho fijo ubicado en un horno solar de una capacidad de 1000 kW ubicado en Font Romeu-Odeillo, Francia (figura 1). La temperatura a la cual se llevó a cabo la pirolisis se sitúa entre los 900 y 1000 oC. La cantidad de producto inicial varió entre 100 y 500 gramos. Un flujo de helio atraviesa el lecho para arrastrar los gases obtenidos de la pirolisis. En la tabla 2 se presenta el análisis de los gases así obtenidos. Se observa que la mayor parte de la mezcla es hidrógeno, monóxido de carbono y metano. El poder calorífico de esta muestra es medio - alto, y la factibilidad técnica de un tal proceso, empleando una fuente energética renovable y gratuita, es alta y con grandes posibilidades para desarrollarlo a nivel masivo.

Tabla 2. Composición de gases obtenidos de la pirolisis del pino y el olote

Compuesto	Composición % mol	
	Pino	Olote
H ₂	35.7	36.0
CO	47.7	38.5
CH ₄	6.6	9.5
CO ₂	6.3	11.0
C ₂ H ₄	1.5	2.4
H ₂ O	1.7	2.2
Otros HC	0.5	0.4

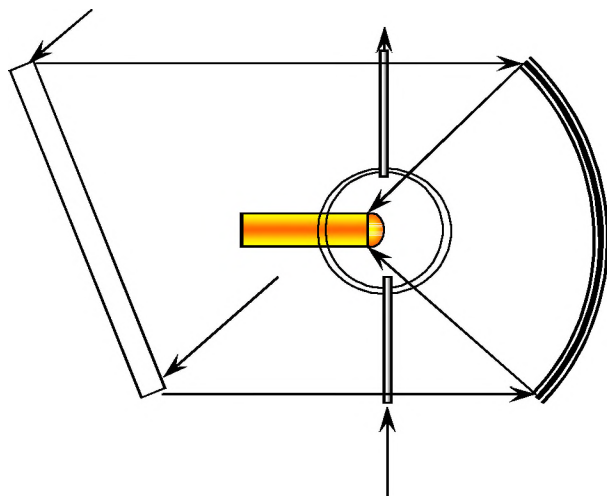


Figura 1. Diagrama del reactor solar empleado en la pirolisis del pino y el olote

El proceso de depolimerización térmica puede convertir una gran variedad de materiales de desecho en aceite y otros productos derivados, en proporciones que varían según el tipo específico de materia prima que se utilice. El proceso consiste en tratar los productos a elevadas temperaturas y presión, con el objeto de ir bajándolos a valores menores. El proceso comienza en un triturador, donde la materia prima se reduce a partículas pequeñas y se mezcla con agua para crear una lechada que se bombea hacia un reactor de primera etapa, donde a elevadas temperaturas y presión, las largas cadenas moleculares se descomponen parcialmente. La mezcla resultante se lleva a un recipiente para que se lleve a cabo una expansión flash, donde la presión baja drásticamente, liberando parte del agua. Este vapor de agua es utilizado para precalentar la mezcla de entrada en el reactor de primera etapa. La materia obtenida, se introduce a un reactor de segunda etapa el cual la lleva a altas temperaturas. Aquí la reacción de descomposición de las cadenas se intensifica. La mezcla caliente se lleva a torres de destilación donde son separadas las diferentes fracciones; gases, aceites ligeros, aceites pesados, agua y carbono sólido. Los gases combustibles se queman en el sitio para obtener la energía requerida por el proceso, y el agua, se canaliza a una planta municipal de desperdicios. Los aceites y carbono se almacenan y se empacan para su venta.

Combustibles alternos derivados de residuos industriales

Los combustibles residuales de mayor demanda son los residuos sólidos que comprenden llantas de desecho, cascos de baterías, tierras contaminadas, trapos y papel sucio y/o contaminado, etcétera, mientras que los residuos líquidos son principalmente disolventes, grasas y aceites usados, residuos de la refinación del petróleo y lodos de destilación. Actualmente, no existe normatividad para la quema de combustibles alternos. Es por ello que los permisos para protocolos de prueba de incineración y las autorizaciones para quemar combustibles alternos en hornos cementeros continúan basándose en un acuerdo con la industria cementera.

Existen plantas mezcladoras de residuos peligrosos que ofrecen a la industria cementera 112 tipos de residuos líquidos, semisólidos y sólidos como combustibles alternos con poder calorífico. Estos provienen principalmente de la industria automotriz, química, electrónica, fabricación de pinturas y refinación de petróleo. Los metales pesados pueden estar presentes en aceites de desecho, tintas, pinturas y solventes. Los desechos químicos orgánicos, como los hidrocarburos que contienen uno o varios de los halógenos (cloro, bromo, flúor y yodo) se encuentran en residuos como la acetona, benceno, tolueno y xileno que se utilizan como solventes, o tetracloruro de etileno, tricloruro de etileno, freones, etcétera.

Según datos de 1997 suministrados por Cementos de México, de un total de 29 plantas cementeras que existen en el país, 14 quemaron "combustible alternativo" durante es año (tabla 3). Datos de 1996, un total de 21 plantas cuentan con permisos provisionales y autorizaciones temporales para quemar residuos peligrosos en sus hornos de cemento, aunque no todos lo han hecho. Destacan por su importancia, el grupo de Cementos Mexicanos (Cemex) en 5 de sus plantas; Cementos Apasco en 6 plantas, Cooperativa Cruz Azul en 2 plantas, Cementos Portland Moctezuma y Cementos de Chihuahua en una planta respectivamente. Es importante subrayar que sólo dos plantas cementeras, la de Ramos Arizpe de Cementos Apasco y la de Torreón

de CEMEX, han quemado residuos peligrosos por más de 5 años. De acuerdo con esa información, cinco de sus plantas quemaron un total de 23,000 toneladas de

residuos peligrosos en 1997, mientras que seis plantas propiedad de Cementos Apasco quemaron 20,000 toneladas en 1998.

TABLA 3. Plantas cementeras que quemaron residuos peligrosos en México, 1997.

COMPañIA CEMENTERA	NÚMERO DE PLANTAS	NÚMERO DE PLANTAS QUE QUEMAN RESIDUOS PELIGROSOS	CANTIDAD QUEMADA EN 1997 EN TONELADAS
CEMEX	18	5	23,000
APASCO	6	6	20,000
CRUZ AZUL	2	2	17,000
MOCTEZUMA	2	1	11,000
CEMENTOS DE CHIHUAHUA	3	0	0
TOTAL	31	14	71,000

Notas: Cada planta recibe sus "residuos alternativos" de diferentes fuentes. Cementos de Chihuahua no quema residuos peligrosos o neumáticos, pero tiene un permiso para protocolos de prueba de incineración de residuos peligrosos y su planta en Samalayuca tiene permiso para preparar la mezcla de combustible.

Fuente: Dr. Ramón Farías, Director de Energía, CEMEX, Conferencia dada en la Fundación EE.UU.-México para la Ciencia, Monterrey, México, 11 de Septiembre, 1988.

Empresas extranjeras, principalmente estadounidenses, han realizado inversiones conjuntas con algunos de los grupos cementeros más fuertes de México para crear nuevas empresas que ofrezcan el servicio de recolección y mezcla de residuos peligrosos, para ofrecerlos como combustible alterno, construyendo plantas mezcladoras en los predios de las industrias cementeras. A inicios de 1998 había seis plantas de mezcla de combustible. Durante el transcurso de 1998 y 1999, el gobierno mexicano dio autorización a 8 instalaciones más para la mezcla de combustibles. Esta estrategia ha sido impulsada por empresas cementeras mexicanas como una forma de ahorrar dinero en combustible, y por industrias estadounidenses que manejan residuos peligrosos como Waste Management, BFI y Mobley Environmental Management. BFI y Metalclad se unieron en México para colaborar con BFI Omega que preparaba residuos peligrosos para su quema en la industria cementera. De igual manera, Waste Management ayudó financiera y técnicamente en la construcción de la planta Ecoltec que mezcla combustibles cerca de la planta de Cementos Apasco en Ramos

Arizpe, Coahuila. Esta empresa también ha ofrecido asistencia técnica a otra de las instalaciones que tiene la empresa Residuos Industriales Multiquim (RIMSA) para mezclar combustibles. Finalmente, Mobley Environmental Management, junto con CEMEX, invirtió en una planta para mezcla de combustibles conocida como Pro-Ambiente, en las instalaciones de CEMEX en Torreón, Coahuila.

Las dioxinas y furanos son contaminantes orgánicos persistentes, creados en la combustión de residuos peligrosos que contengan cloro (presentes comúnmente en solventes y plásticos) y tienen tres características: son muy tóxicos, son persistentes (su vida media varía de 9 a 15 años en la superficie del suelo) y son bioacumulables (se alojan en los tejidos grasos, aumentando su concentración en la medida que asciende la cadena alimenticia, por ello la mayor concentración la recibe el ser humano)

La ruta de exposición a metales pesados, dioxinas y otros productos de combustión

incompleta se realiza por diversas vías, entre ellas podríamos señalar:

- Inhalación de las emisiones.
- Afectación directa a trabajadores de las plantas de cemento.
- Las emisiones pueden llegar bastante lejos del lugar donde se generaron por medio de corrientes de aire, para luego depositarse en agua y suelo. Esta contaminación afecta cosechas y plantas, y se acumula en peces y animales (incluyendo carne, leche y huevos), además de pasar al ser humano al ingerir alimentos contaminados.

Las dioxinas son uno de los 12 contaminantes orgánicos persistentes (COP) que la ONU ha recomendado reducir y eventualmente eliminar en forma prioritaria, durante el proceso de negociaciones del Convenio de los COP, iniciado en Montreal, Canadá, en junio de 1998.

Por ello las plantas cementeras que han ingresado a l uso de combustibles residuales, tienen el mayor interés de dar seguimiento cercano a la composición de sus emisiones al medio ambiente y dar solución, a través de la instalación de sistemas de control, a los problemas medioambientales que puedan generar.

En cuanto al conjunto de desechos plásticos, estos pueden ser procesados de suerte de obtener un combustible alternativo o bien un monómero que permita el reciclado del plástico. Para ello se utilizan actualmente tres procesos genéricos: gasificación, pirólisis y depolimerización.

Gasificación de plásticos

La gasificación es la oxidación parcial de los hidrocarburos a temperaturas intermedias (350 – 450 °C, que puede producir gas de síntesis (mezcla la de monóxido de carbono e hidrógeno) y puede utilizarse como combustible para la generación de electricidad, materia prima para la fabricación de metano, amoníaco de alcoholes OXO o, incluso, como agente reductor para la producción de acero en altos hornos. Presenta la ventaja, frente a otros procedimientos de reciclado químico, de poder admitir como alimentación toda la corriente de residuos municipales, sin

necesidad de separar previamente los plásticos.

Son muchas las compañías que están investigando esta opción de reciclado, entre ellas Shell Oil, C. (Reinink 1993), pero es Thermoselec, S.A. (Locarno, Suiza) quien lidera esta tecnología. En su planta piloto instalada en Verbania (Italia) se tratan 4,2 t/hr de residuos sólidos municipales, que producen (50kg de gas de síntesis, 220 kg de escoria, 23kg de metales y 18 kg de sales por cada tonelada de residuo tratado. En el proceso, los residuos previamente compactados y desgaseificados se pirolizan a 600 °C y alimentan al gasificador a 2.000 °C. El gas de síntesis obtenido, una vez limpio, se quema en una turbina de gas para producir 300 kw de electricidad.

Reciclado con generación de fracciones hidrocarbónicas

Las tecnologías empleadas en la industria petrolera para transformar fracciones petrolíferas de alto peso molecular en otras más ligeras son una alternativa válida para el reciclado de los materiales plásticos, sobre todo si éstos alimentan a las unidades de refinería junto con sus cargas tradicionales.

Una de los posibles procesos utilizables atiende al uso, o no, de agentes catalíticos. Los procesos meramente térmicos, tales como el cracking térmico, la pirólisis y la termólisis, se llevan a cabo, con o sin adición de oxígeno, a temperaturas de operación entre 400-1000 °C, bajo presión reducida o en atmósfera inerte generalmente en un lecho fluidizado de arena. Los hidrocarburos producidos pueden ser tratados en refinería o utilizados como combustibles.

Entre las actividades llevadas a cabo en esta área destacan las del consorcio de BP e integra a Petrofina, DSM, Enichen y Elf-Atochem, con el objetivo de a escalar la tecnología desarrollado inicialmente por la empresa británica (Rotman, 1994). El proceso opera a 600 °C y produce un gas que contiene aproximadamente un 60% de una mezcla de componentes C2, C3, C4 y nafta. El cloro es absorbido por un lecho de óxido cálcico, manteniendo un bajo nivel de su concentración en el gas craqueado.

Para el aprovechamiento de los residuos plásticos también se pueden utilizar procesos

catalíticos tales como el cracking, hidrocracking o hidrogenación. Los tratamientos en presencia de hidrógeno son, por el momento los que parecen más desarrollos. Veba Oel modificó en 1992 una unidad de tratamiento de residuos de crudo en Bottrop (Alemania) para alimentar plásticos molidos. Tras una serie de ensayos con buenos resultados, está previsto reciclar hasta 40.000 t/año de residuos plásticos con contenidos PVC de hasta un 10% (Fouhy, 1993). La unidad opera a 150-300 kg/cm² y 470 °C, en atmósfera de hidrógeno y produce un "syncrude" que contiene un 60% de parafinas, 30% de nafta, 9% de aromáticos y un 1% de olefinas. La conversión es del 80% con una eficiencia energética del 88% vía neutralización del HCl generado. Este crudo sintético se utiliza para alimentar una refinería y complejo petroquímicos cercanos.

En los procesos de craking o hidrocracking catalítico, la transformación de los residuos tienen lugar en presencia de zeolitas, aluminio silicatos o catalizadores súper ácidos, para obtener fracciones de hidrocarburos de diferente composición y uso: C4-C7 para gasolina C8-C16 para lubricantes sintéticos u oligómeros que se que se pueden emplear como depresores del punto de congelación o mejoradores del índice de viscosidad de aceites lubricantes.

Depolimerización

La reconversión directa a los monómeros de partida de un polímero, que pueden así ser de nuevo polimerizados regenerado el polímero virgen, es aplicable a macromoléculas de policondensación, con el polietilentereftalato (PET) y poliamidas (nylons) y a algunos polímeros de adición como es el caso de los poliuretanos. El éxito de este tipo de tratamientos depende, en gran manera, de la disponibilidad de una materia prima bien definida a través de un buen sistema de recolección y limpieza y de los costos de reprocesado del polímero. La depolimerización térmica del polimetilmetacrilato con rendimientos de hasta el 97%, está siendo utilizada ampliamente por la mayor parte de los fabricantes europeos, como Parachemie y AtoHaas en Alemania y Francia, respectivamente. Du Pont también utiliza comercialmente la depolimerización térmica del poliacetal para generar formaldehído.

La depolimerización química se efectúa, fundamentalmente, a través de reacciones de hidrólisis, alcoholisis o glicólisis. Así, en el caso del poliuretano se usan industrialmente la alcoholisis y la glicólisis, aunque en dura competencia con el reciclado directo del material. Aunque la hidrólisis del PET puede emplearse como vía química de reciclado, generando los ácidos carboxílicos y los alcoholes, los fabricantes de bebidas utilizan, en la producción de nuevas botellas, la depolimerización química basada en la metanólisis del PET que los regenera tras la correspondiente separación y purificación de sus componentes base: tereftalano de metilo y etilenglicol.

CONCLUSIONES

Existen un conjunto de combustibles alternativos a los convencionales que pueden ser sintetizados o producidos mediante el uso de materiales orgánicos de desecho o biomasa expresamente cultivada para ese objetivo. Todos los combustibles, en esencia, están formados por moléculas conteniendo carbón, hidrógeno y azufre, que son los combustibles por excelencia. El azufre, sin embargo, genera dióxido de azufre que es nocivo para el medio ambiente y la salud de sus habitantes, por lo que será necesario prescindir de él.

En este trabajo se han presentado las diferentes alternativas que se tienen para el uso y obtención de diferentes combustibles, así como se ha descrito los diferentes procesos de producción. Se ha presentado la aplicación de técnicas como la gasificación y la pirolisis para la obtención de combustibles gaseosos y líquidos a partir de otros con propiedades menores como es el carbón de hulla, la arena de alquitrán y esquistos bituminosos. Su enriquecimiento a través de la gasificación permite obtener, en la mayoría de los casos, un combustible con mejores propiedades que el de partida.

El uso de la biomasa, por otro lado, es una alternativa muy atractiva, pues a través de procesos como son los bioquímicos; fermentación y digestión anaerobia, los termoquímicos que son la gasificación, la pirolisis y la depolimerización térmica es factible obtener combustibles gaseosos o líquidos y, como es el caso de la última

tecnología señalada, carbón. Las técnicas señaladas han sido probadas en muchos laboratorios a nivel mundial y en algunos casos se tiene ya plantas industriales operando normalmente, las que han demostrado la rentabilidad de los procesos y, por supuesto, su factibilidad técnico – económica. La mayor parte de los combustibles así obtenidos son el gas de síntesis, el signas y los biodiesel, que son obtenidos según la tecnología empleada.

Se presentó un caso de estudio donde se efectuó la pirolisis del pino y el olote mediante un reactor solar colocado en un horno solar de 1000 kW. La producción de sygas permitió demostrar la factibilidad del uso de fuentes alternas de energía; el sol, para el procesamiento de desechos agrícolas para la generación de vectores energéticos.

La depolimerización térmica también ha sido empleada para el procesamiento de residuos orgánicos de cualquier naturaleza y mismo plásticos que normalmente van a dar a los tiraderos generando focos de contaminación importantes. Este proceso no solo genera combustibles sino también es posible separar metales pesados, minerales de grado fertilizante y mismo tinta industrial.

En fin, se concluye que las diferentes alternativas que hay para la obtención de combustibles alternos son varias y que se puede hacer frente a un avenir libre de petróleo, con solo procesar los propios desperdicios orgánicos que el hombre genera, lo que contribuye, además, a mejorar el medio ambiente y disminuir drásticamente el impacto ambiental derivado del uso de combustibles pesados.

Berkowitz N., An introduction to coal technology. Academic press, New York, 1979

Donath, E. E., Hydrogenation of coal and tar. In Chemistry of coal utilization, supplementary volume (H.H. Lowry, Ed.) pp. 1041-1080. Wiley, New York, 1963.

Fouhy, K. et al., Chemical Engineering. December, pp. 30-33 (1993).

Limley, B., Cualquier cosa en petróleo, Discover, en español, pp. 41 – 47, junio del 2003.

Morgan, J.J., Water gas, In Chemistry of coal utilization, Vol. II, (H.H. Lowry, Ed.) pp. 1673 – 1749, Wiley, New York, 1945.

Probststein, R. F., and Hicks R. E., Synthetic Fuels, McGraw Hill Book Company, 1982.

Reinink, A. Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 20(5). pp. 259-263 (1993).

Rotman, D. y Chynoweth E. Chemical Week, march 2. pág. 20-22 (1994).

Shnidmann, L., Utilization of coal gas, In Chemistry of coal utilization, Vol. II, (H.H. Lowry, Ed.) pp. 1252 – 1286, Wiley, New York, 1945.

Storch, H.H., Hydrogenation of Coal and Tar, In Chemistry of coal utilization, Vol. II, (H.H. Lowry, Ed.) pp. 1750 – 1796, Wiley, New York, 1945.

Storch, H.H., Synthesis of Hydrocarbons from water gas, In Chemistry of coal utilization, Vol. II, (H.H. Lowry, Ed.) pp. 1797 – 1845, Wiley, New York, 1945.

BIBLIOGRAFÍA