

MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

CURSO: ENERGÉTICA AMBIENTAL

PROFESOR: JORGE ANTONIO POLANÍA PUENTES

CONTENIDO DEL CURSO

- **ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**
- **CALOR Y TRABAJO**
- **APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LA ENERGÍA SOLAR**
- **ENERGÍA DE COMBUSTIBLES**
- **CALOR RESIDUAL Y CONTAMINACIÓN TÉRMICA**

UNIDAD 4. ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES

- Fisicoquímica de la combustión.
- Máquinas de combustión y sus efectos ambientales.
- Petróleo. Gas natural. Carbón. Futuro de los diferentes combustibles.

4.1 FISICOQUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN

El oxígeno tiene la capacidad de combinarse con diversos elementos para producir óxidos. Por ende, oxidación es la combinación del oxígeno con otra sustancia. Existen oxidaciones que son sumamente lentas, como por ejemplo la del hierro. Cuando la oxidación es rápida se llama combustión.

Pues bien, la combustión se refiere a las reacciones químicas que se establecen entre cualquier compuesto y el oxígeno. En una combustión el material que arde, como el alcohol, es el combustible y el que hace arder, como el oxígeno, se llama comburente.

Ignición es el valor de temperatura que debe presentar el sistema fisicoquímico para que se pueda haber combustión de manera natural. El proceso termina cuando se consigue el equilibrio entre la energía de los compuestos que reaccionan y la de los productos de la reacción. Con el punto de ignición se alcanza la temperatura de inflamación, activado por la energía de una chispa o por la llama de un fósforo.

En resumen, la combustión es un proceso de transformación de la materia que se inicia con un aporte de energía y que, en presencia de oxígeno, da lugar a la formación de nuevas sustancias y a la liberación de energía en forma de calor y luz. El carbono y el hidrógeno (hidrocarburos) son los elementos que entran en combustión más fácilmente.

El fuego es un proceso de combustión por una reacción química de oxidación rápida del combustible, de suficiente intensidad para emitir calor y en muchos casos llama.



La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son CO_2 y H_2O . Se denominan en forma genérica productos, humos o gases de combustión. Es importante destacar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno, el otro componente del aire. Por lo tanto el nitrógeno del aire pasará íntegramente a los productos de combustión sin reaccionar.

Entre las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los productos o humos de la reacción se encuentran:

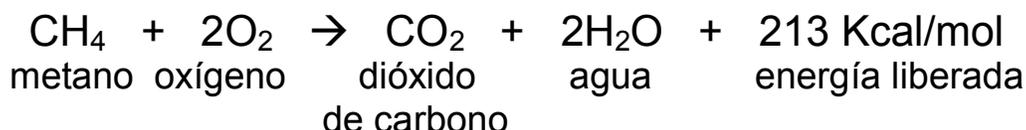
CO_2 Dióxido de Carbono, H_2O Vapor de Agua, N_2 Nitrógeno gaseoso, O_2 Oxígeno gaseoso, CO Monóxido de Carbono, H_2 Hidrógeno gaseoso, Carbono en forma de hollín, SO_2 Dióxido de Azufre.

Las reacciones de combustión son muy *exotérmicas*, o sea que liberan mucha energía. Justamente por esto se las utiliza para generar energía que se aprovecha en distintas formas.

Existen dos tipos de combustión: Combustión completa y Combustión incompleta.

Combustión completa: En general, las reacciones de combustión cotidianas se caracterizan por la presencia de una llama; el color de esta permite predecir qué productos son los que están presentes en la combustión. Si es azul, los productos, en general, son: dióxido de carbono gaseoso y vapor de agua. Estos productos no son tóxicos. Por consecuencia de los productos que se obtienen se dice que este tipo de combustión es limpia o segura.

Por ejemplo, para la reacción de combustión del gas natural:



Combustión incompleta. La llama que se obtiene, es una llama amarilla brillante. Los productos que se generan son: dióxido de carbono, agua, carbón u hollín, y monóxido de carbono. Gran parte de la energía liberada es lumínica, por eso son usadas muchas veces para obtener luz. La luz intensa se debe a que las pequeñas partículas de carbón que se forman durante la reacción se encuentran incandescentes, a la temperatura de la llama. Libera menos calor que la anterior.

Una reacción entre los mismos elementos, pero en distintas proporciones, va a dar distintos productos. Por eso para representar la reacción entre metano y oxígeno de una

combustión incompleta, pueden ser dos diferentes ecuaciones, dependiendo del producto que den.

Para el metano, las ecuaciones de combustión incompleta son:



En esta se obtiene como producto además del agua, carbón.



En esta se obtiene como producto además del agua, monóxido de carbono.

Calor específico de combustión

Se define el calor específico de combustión (l) como la cantidad de calor (Q) que cede la unidad de masa del cuerpo al quemarse totalmente. El calor específico de combustión (l) se expresa en unidades de energía (J) por unidades de masa (kg) y depende del tipo de combustible. Iguales masas de combustibles diferentes, desprenden diferentes cantidades de calor (Q) al quemarse totalmente. De otro modo, masas diferentes del mismo combustible desprenden, también, diferentes cantidades de calor (Q). La cantidad de calor (Q) desprendida por cierta masa (m) de combustible, al quemarse totalmente, puede ser calculada mediante la fórmula:

$$Q = l * m.$$

El calor específico de combustión generalmente se relaciona con los materiales considerados como combustibles

tradicionales (petróleo, carbón, alcohol, leña, etc.), pero también puede ser asociado con los combustibles alternativos; por lo que es importante conocer las potencialidades combustibles de diferentes materiales que no se emplean con frecuencia en la combustión, mediante el conocimiento de sus calores específicos de combustión.

Para poder apreciar con más claridad las potencialidades combustibles de los materiales que se emplean en la combustión para lograr el desprendimiento de energía térmica, resulta posible iniciar el análisis con el conocimiento de los calores específicos de combustión de dichos materiales.

Material combustible	Calor específico de combustión(MJ/kg)
Hidrógeno	142
Gas metano	55
Gasolina	47
Petróleo crudo	47
Queroseno	46
Carbón bituminoso	36
Antracita	35
Coque	34
Alcohol etílico	30
Carbón vegetal	22
Alcohol metílico	21
Madera de pino	20
Cascarón de coco	18

Leña	seca	16
Turba	húmeda	15
Aserrín	seco	15
Cáscara de	arroz	9
Bagazo de	caña	9
seco		9
Leña	verde	8
Planta de	maíz	
seca		
Aserrín	húmedo	

Cuando se estudian los valores relativos a los calores específicos de combustión de los combustibles, se pueden extraer algunas conclusiones de relevante importancia para lograr mayor eficiencia en su empleo.

Resulta interesante apreciar cómo el calor de combustión de la leña seca es el doble del correspondiente a la leña verde. Este hecho nos conduce a concluir que si cierta masa (m) de leña húmeda desprende una cantidad de calor (Q) al quemarse totalmente, entonces, cuando quemamos una masa ($m/2$) de leña seca podemos obtener la misma cantidad de calor. En otras palabras, al utilizar la leña seca se ahorra la mitad de la madera que se quema. Esto nos indica que durante la utilización de la madera como combustible siempre será más conveniente emplear la leña seca, en consideración a su calor de combustión.

Si se comparan los valores del calor de combustión del carbón vegetal y de la leña seca, se puede concluir que el valor del primero es aproximadamente 1,7 veces mayor. De aquí que la opción de utilizar el carbón vegetal en sustitución

de la leña no sea despreciable en términos de eficiencia. Por otra parte, la combustión del carbón vegetal resulta mucho menos contaminante que la combustión de la leña seca. Estos datos demuestran que en lugar de continuar el empleo de la leña en los fogones, sería recomendable incrementar la fabricación del carbón, que es más eficiente por su potencia calorífica y más ecológico como combustible.

Los calores de combustión de la cáscara del arroz y del cascarón de coco muestran que estos residuos tienen propiedades combustibles apreciables. Su combustión debe siempre estar vinculada con procesos productivos, ya que su quema indiscriminada representa la pérdida de grandes cantidades de energía. El calor desprendido al quemar una tonelada de cáscara de arroz, es equivalente a la combustión de 320 kg de petróleo crudo.

Entre los combustibles relacionados en la tabla se destaca el significativo valor del calor de combustión del hidrógeno. Este gas tiene propiedades muy importantes como portador energético y sus potencialidades de obtención a partir de la reconversión de la energía solar están dando resultados muy satisfactorios en la actualidad.

Otro gas, en este caso el metano, tiene también un valor de calor de combustión considerable. El metano, que puede ser obtenido fácilmente mediante la fermentación de la biomasa en los digestores y con un bajo costo de producción, tiene una amplia utilización práctica como combustible, tanto doméstico como en la industria. Su alto poder de combustión indica que el incremento en su producción debe ser un

objetivo para garantizar una fuente estable de energía a partir de los residuales de la biomasa.

Aplicaciones de las reacciones de combustión

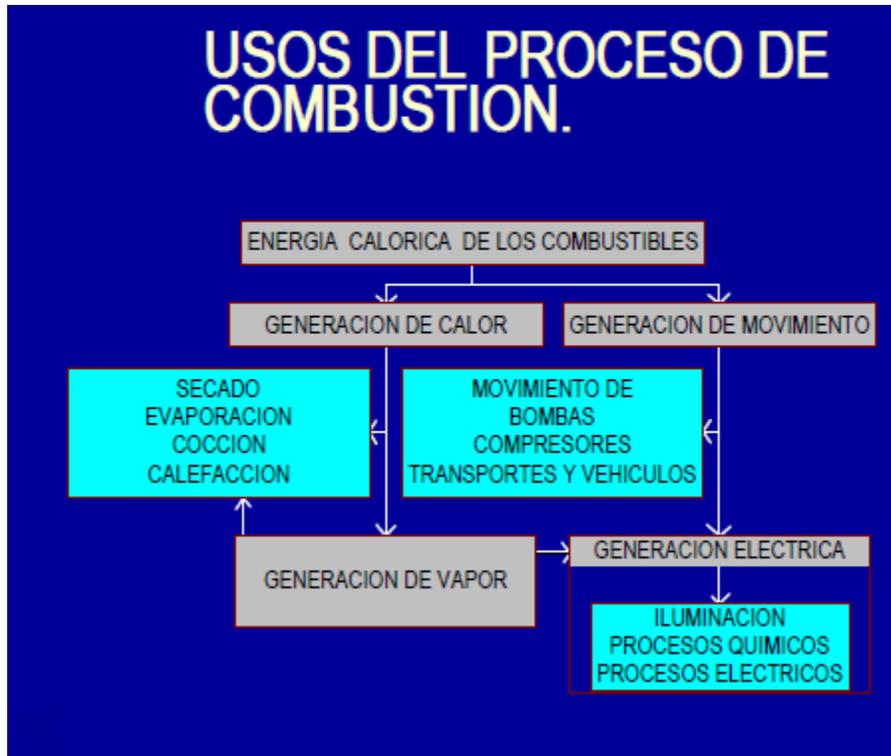
Las reacciones de combustión son muy útiles para la industria de procesos ya que permiten disponer de energía para otros usos y generalmente se realizan en equipos de proceso como hornos, calderas y todo tipo de cámaras de combustión.

En estos equipos se utilizan distintas tecnologías y dispositivos para llevar a cabo las reacciones de combustión.

Un dispositivo muy común denominado *quemador*, produce una llama característica para cada combustible empleado. Este dispositivo debe mezclar el combustible y un agente oxidante (el comburente) en proporciones que se encuentren dentro de los límites de inflamabilidad para el encendido y así lograr una combustión constante.

Es importante comprender que como resultado de una combustión, mediante la operación de estos dispositivos, se pueden producir sustancias nocivas y contaminantes, las cuales deberán ser perfectamente controladas, reduciéndolas a concentraciones permitidas o eliminadas, de acuerdo a la legislación vigente sobre el tema.

USOS DEL PROCESO DE COMBUSTION.



4.2 MÁQUINAS DE COMBUSTIÓN

El calor necesario para conseguir que funcione una máquina térmica procede, generalmente, de la combustión de un *combustible*. Dicho calor es absorbido por un fluido que, al expandirse, pone en movimiento las distintas piezas de la máquina.

El rendimiento de una máquina térmica es el cociente entre la energía mecánica producida y el calor tomado del foco caliente. Las máquinas térmicas tienen rendimientos muy bajos, ya que tan sólo una pequeña parte del calor producido se puede transformar en trabajo, y el resto se utiliza en calentar el fluido que pone en movimiento a la máquina, en vencer el rozamiento de las piezas que la componen o simplemente se disipa al ambiente en forma de calor.

Las máquinas trabajan en ciclos. Una máquina térmica perfecta realizaría un ciclo ideal en el que todo el calor se convertiría en energía mecánica. El físico e ingeniero francés Nicolas L. Sadi Carnot, que concibió un ciclo termodinámico como el ciclo básico de todas las máquinas térmicas, demostró que no puede existir esa máquina perfecta.

Un refrigerador es una máquina que funciona a la inversa de una máquina térmica, es decir, es una máquina que mediante la realización de un trabajo toma calor de una región fría y lo cede a una caliente. Para extraer el calor se aprovechan dos procesos que transcurren con absorción de calor: la evaporación de un líquido y la expansión de un gas.

En una máquina térmica, la combustión puede producirse en el interior o en el exterior de la propia máquina, por lo que se clasifican en: Máquinas de combustión interna y máquinas de combustión externa.

MAQUINAS DE COMBUSTION INTERNA

<https://www.youtube.com/watch?v=X3Zc-hEedVI>

A pesar de todos los avances y análisis en motores eléctricos o de aire, celdas de combustible y la propulsión humana, la máquina tradicional de combustión interna sigue reinando.

En estas máquinas el calor se libera en su interior debido a la combustión de ciertos productos llamados carburantes, como la gasolina.

El motor a gasolina convierte un fenómeno químico en uno mecánico que es el empuje que recibe el pistón y que lo trasmite a la biela y esta al cigüeñal, produciendo finalmente un movimiento de giro que será aprovechado por el sistema de transmisión del vehículo para hacer que las ruedas se muevan.

El ciclo que describe el fluido de trabajo de dichas máquinas se denomina *ciclo de Otto*, inventado a finales del siglo XIX por el ingeniero alemán del mismo nombre.

Está basado en una ingeniosa distribución de las carreras del pistón aprovechando cuatro tiempos o movimientos para recibir el combustible, comprimirlo, explotarlo y finalmente expulsar los gases que deja la combustión. Esos cuatro pasos (Admisión, Compresión, Explosión y Escape) los utiliza el motor de explosión de cuatro tiempos.

Aspiración: El pistón baja y hace entrar la mezcla de aire y gasolina preparada por el carburador en la cámara de combustión.

Compresión: El émbolo comprime la mezcla inflamable. Aumenta la temperatura.

Expansión: Una chispa de la bujía inicia la explosión del gas, la presión aumenta y empuja el pistón hacia abajo. Así el gas caliente realiza un trabajo.

Expulsión: El pistón empuja los gases de combustión hacia el tubo de escape.

El rendimiento del ciclo de Otto, como el de cualquier otra máquina térmica, viene dado por la relación entre el trabajo total realizado durante el ciclo y el calor suministrado al fluido de trabajo:

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = 1 - \frac{Q_{ced}}{Q_{abs}}$$

MAQUINAS DE COMBUSTION EXTERNA

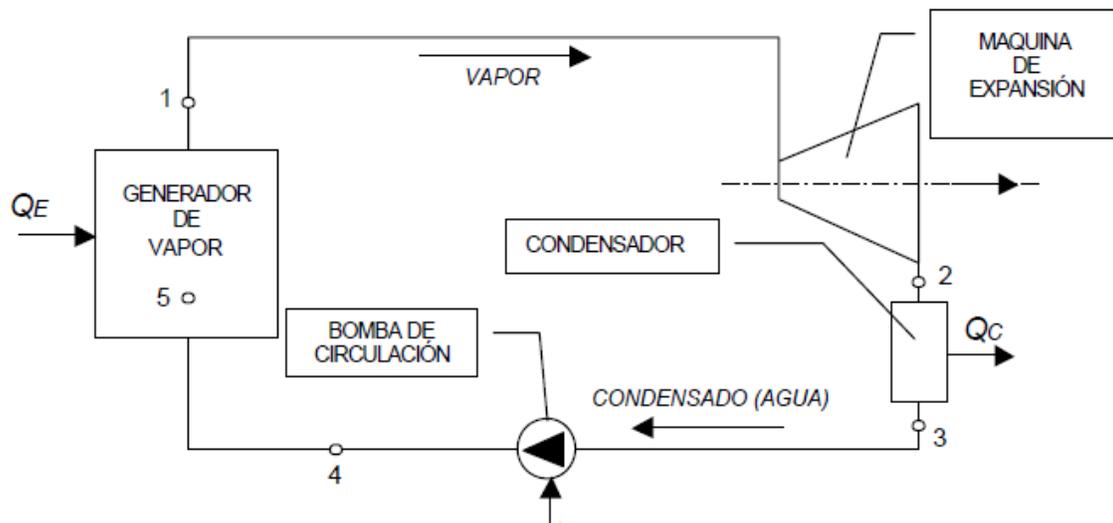
Son aquellas maquinas en las que el combustible es utilizado para formar vapor fuera de la máquina y parte de la energía interna del vapor se emplea en realizar trabajo en el interior de la máquina.

La introducción de la máquina de vapor llevó a numerosas invenciones en el transporte y la industria. Las máquinas de vapor convierten la energía térmica en mecánica, a menudo haciendo que el vapor se expanda en un cilindro con un pistón móvil. El movimiento alternativo del pistón se convierte en giratorio mediante una biela.

Este tipo de máquina pueden ser máquinas alternativas o máquinas rotativas. En ambos casos, los sistemas mecánicos básicos resultan similares a los de los correspondientes a las máquinas de combustión interna; es decir que en el caso de las alternativas el transductor básico es el mismo sistema de

pistón y cilindro, vinculado cinemáticamente con el cigüeñal por medio de una biela entera o partida y en el caso de las rotativas, se trata de turbomáquinas similares a las de gas, de las cuales se diferencian por no requerir el generador de gases.

Se pueden entender los ciclos de las máquinas de combustión externa a partir del siguiente esquema:



EFFECTOS AMBIENTALES

Sin duda que los combustibles proporcionan bienestar al hombre. Pero también es cierto que algunos de ellos contribuyen enormemente a la contaminación del aire o atmosférica. La atmósfera, la capa de aire que rodea a la Tierra, permite la vida en ella y protege a ésta y a los seres humanos.

Esta capa de aire puede ser contaminada por los incendios forestales, por los humos de las industrias, por la emisión de gases por combustiones de petróleo, carbón u otro debidas a la actividad humana.

En efecto, la contaminación que produce el hombre se origina en la combustión de carburantes como el petróleo y sus derivados, el carbón, la leña y el gas natural. En la combustión de éstos se emiten gases como el monóxido de carbono, el óxido de nitrógeno y el óxido de azufre, entre otros.

Por lo tanto, los transportes, las calefacciones domésticas, las centrales térmicas, que usan este tipo de combustibles, son los principales focos de emisión de contaminantes para el aire.

Con relación a los motores de combustión interna, el impacto ambiental está estrechamente relacionado con un problema social surgido por la utilización creciente del mismo: la reducción de los niveles de emisión de sustancias tóxicas y de los llamados "gases de invernadero", y la reducción de los niveles de ruido.

Durante el trabajo de estos motores de émbolo se desprenden las siguientes sustancias tóxicas principales: óxidos de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos, aldehídos, sustancias cancerígenas (bencipireno), compuestos de azufre y plomo. Además de los gases de escape, otras fuentes de toxicidad son también los gases del cárter y la evaporación del combustible a la atmósfera. Incluso en un motor bien regulado la cantidad de componentes tóxicos que se expulsan durante su funcionamiento puede alcanzar los siguientes valores:

Componentes tóxicos	Motores Diesel	Motores de carburador
Monóxido de carbono, %	0.2	6
Óxidos de nitrógeno, %	0.35	0.45

Hidrocarburos, %	0.04	0.4
Dióxido de azufre, %	0.04	0.007
Hollín/ mg/l	0.3	0.05

De este modo, la toxicidad de los motores Diesel depende en lo principal del contenido de los óxidos de nitrógeno y el hollín. La toxicidad de los motores de encendido por chispa y carburador depende en gran medida de la concentración del monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno.

El único combustible que se considera como emisor de material particulado por concepto de calefacción es la leña. Otros combustibles derivados del petróleo, tales como el gas licuado, el petróleo para calefacción, el kerosene doméstico y el gas natural, se consideran con cero emisiones de material particulado.

Para clasificar el material particulado existen dos métricas comúnmente utilizadas: partículas menores a 10 micrones (MP10) y partículas menores a 2,5 micrones (MP2.5). En el MP10 se pueden distinguir dos fracciones: la gruesa, es decir, entre 2,5 y 10 micrones y la fina, menor a 2,5 micrones. Mientras más pequeño es el tamaño de la partícula, más profundamente puede entrar en los pulmones y sistema respiratorio, acarreando toxinas por el cuerpo a través de la sangre.

4.3 PETRÓLEO, GAS NATURAL y CARBÓN

Las fuentes de energía se pueden dividir en dos grandes subgrupos: permanentes (renovables) y temporales (no renovables). En principio, las fuentes permanentes son las que tienen origen solar, de hecho todos sabemos que el Sol permanecerá por más tiempo que la especie humana. Aún así, el concepto de renovabilidad depende de la escala de tiempo que se utilice y el ritmo de uso de los recursos. Por otra parte, los combustibles fósiles se consideran fuentes no renovables ya que la tasa de utilización es muy superior al ritmo de formación del propio recurso.

EL Gas Natural

El gas se comenzó a considerar como combustible hace apenas 50 años, antes representaba un peligro que debía evitarse. Era más fácil el producir gas a partir del carbón que extraerlo de la tierra lo que incrementó su desinterés. Pero hoy día las nuevas tecnologías han conseguido que eso no sea así, por lo que el 18% de la energía que se consume en el mundo proviene del gas.

El gas natural está compuesto de gases y esta mezcla varía según el caso. Más del 92% de este gas, está compuesto sólo de átomos de Carbono e hidrógeno. El Metano, Etano, Propano y Butano, son algunos de estos gases.

El gas natural es el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los utilizados, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización.

El Carbón

Es el combustible llamado fósil porque es el producto de un largo proceso experimentado por grandes cantidades de restos vegetales sepultados hace millones de años entre los sedimentos de la superficie.

Cuando queremos combustionar un carbón es necesario llegar a una cierta temperatura para provocar su inflamación, por lo que será necesario aportar una cierta cantidad de calor. Hay que acumular calor hasta superar la llamada temperatura de inflamación.

Desde el punto de vista técnico, para que se origine un proceso de combustión tiene que ocurrir que la velocidad de oxidación debe ser lo bastante alta para que el calor desprendido en la reacción sea elevado. Debido a lo complicado de la estructura del carbón, se pueden producir ciertas reacciones de descomposición o transformación (pirólisis), lo que puede hacer que el carbón, tras sufrir este proceso, no sea tal, sino que se convierta en una serie de compuestos derivados. En la pirólisis, el carbón se descompone en ciertos productos, siempre en ausencia de oxígeno. Primero se segrega el agua, después moléculas de mayor tamaño que se desgajan, y así sucesivamente. El hecho de que esto se produzca en ausencia de oxígeno implica que no se produzca la combustión. Sin embargo, puede darse el caso de que el calor producido sea suficiente para alcanzar la temperatura de inflamación, y se produce la oxidación del carbón.

Otro factor que se debe tener en cuenta en la combustión del carbón es que se encuentra en estado sólido, por lo que para favorecer el contacto entre combustible y comburente hay

que aumentar la superficie de contacto. Para ello se hace necesario disminuir el tamaño de la partícula, por lo que se tiende a formar prácticamente polvo.

El Petróleo

El petróleo es utilizado como lubricante, combustible, materia prima para la elaboración de: plásticos, pinturas, cosméticos, explosivos y hasta alimentos. Por lo que pasa a ser la fuente de energía más importante del mundo. Correspondiendo a un tercio del total de la energía utilizada en el mundo.

El petróleo, es un aceite mineral formado por una mezcla de hidrocarburos.

FUTURO DE LOS DIFERENTES COMBUSTIBLES.

Los biocombustibles se consideran respetuosos con el clima. Pero cuando se queman, también liberan CO₂ al medio ambiente, el que será absorbido por las plantas. La ecuación es más o menos así: para producir la biomasa que dará origen a los biocombustibles, los campesinos necesitan abono nitrogenado en grandes cantidades. Para producir ese abono, es imprescindible la energía. Y la energía generalmente se genera a partir de combustibles fósiles. Incluso hay estudios que dicen que los biocombustibles pueden incluso causar más emisiones nocivas que los combustibles fósiles.

Cada vez se escucha hablar más del *hidrógeno*, considerándolo, dadas sus propiedades físicas y químicas, como un importante combustible sintético del futuro. Esto se

basa en sus características de ser renovable, abundante y no contaminante, que lo convierten en un combustible ideal. Efectivamente, el hidrógeno es limpio, pues el producto de su combustión con el oxígeno es simplemente vapor de agua.

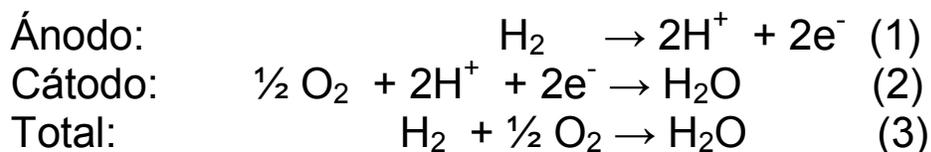
El hidrógeno es abundante y renovable, pues es posible extraerlo a su vez de la descomposición del agua mediante la electrólisis, utilizando una fuente primaria de energía. Si comparamos al hidrógeno con los combustibles tradicionales, la diferencia más importante a tener en cuenta es que el hidrógeno sólo deja como subproducto de su combustión vapor de agua, mientras que los otros además producen dióxido y monóxido de carbono. De ahí que resulte ser un combustible limpio, no contaminante.

Otra característica importante que diferencia al hidrógeno radica en que es posible obtenerlo a partir del agua mediante electrólisis utilizando la electricidad generada por alguna fuente primaria de energía (p. ej. eólica, solar, nuclear, etc.), y una vez quemado se vuelve a general la misma cantidad de agua inicial, cerrándose un ciclo en el cual el medio ambiente no se altera. Esta característica sumada al hecho de existir tanta agua en el planeta, lo convierten en un combustible renovable y abundante.

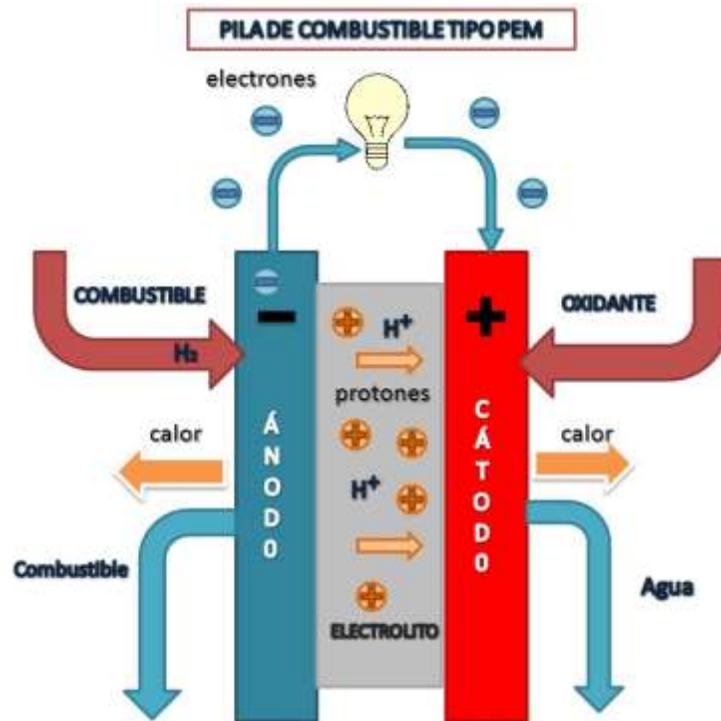
Desde el punto de vista energético, el hidrógeno es, de todos los combustibles, el que tiene la máxima relación energía/peso.

Una manera más accesible de usar el hidrógeno es a través de celdas de combustible que tiene una eficiencia 2,5 veces mayor que si se quema hidrógeno en un motor térmico. En una celda de combustible (ver esquema abajo), los reactivos (hidrógeno y oxígeno del aire) alimentan a los correspondientes electrodos, constituidos por materiales porosos los mismos se encuentran en un electrolito adecuado, estableciéndose una diferencia de potencial que

mantiene un flujo de electrones, esto es, una corriente eléctrica, que puede efectuar trabajo útil. Las reacciones que ocurren en la celda con electrolito ácido son las siguientes:



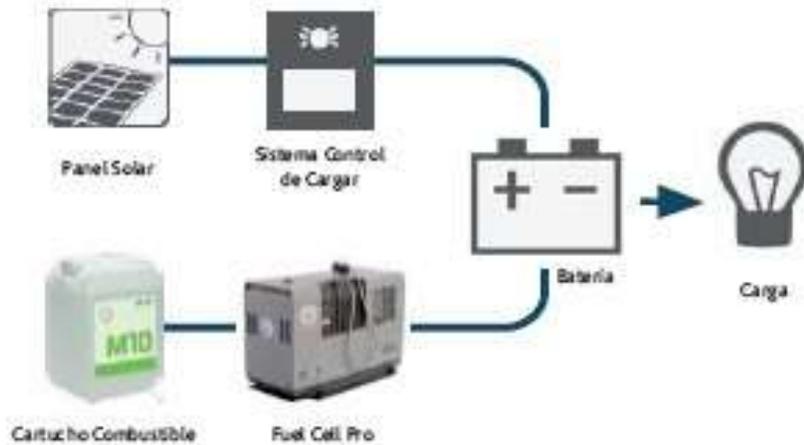
Como puede verse, el producto de la reacción (3) es agua que no contamina el ambiente. En la celda se genera también una cierta cantidad de calor debido al cambio entrópico ($T\Delta S$) asociado a la reacción (3), por lo cual la eficiencia máxima intrínseca es 91 % a 150 °C. En la práctica, cuando se drenan corrientes apreciables, existen otras pérdidas de energía como calor liberado, asociadas a los sobrepotenciales, que son causados por la irreversibilidad de las reacciones que ocurren en la celda y a caídas óhmicas. Ésta últimas pueden reducir la eficiencia a valores de 60-80 %, según las condiciones de operación. Estas características determinan que las celdas de combustible sean útiles también como sistemas de cogeneración de electricidad y calor.



Entre las aplicaciones de mayor impacto de estas celdas, se pueden mencionar las celdas de tecnología de membrana de intercambio de protones (PEM) de Ballard para vehículos eléctricos con emisión cero de contaminantes de Daimler-Benz.

El uso de una celda de combustible como apoyo para un sistema de energía solar es la solución perfecta para el 100% de disponibilidad. Tan pronto como el sistema solar deja de proporcionar suficiente energía, la pila de combustible se activa automáticamente. Los costosos sistemas solares pueden reducirse y la fiabilidad del sistema puede ser mejorada sustancialmente.

FUEL CELL + SISTEMA SOLAR



Las celdas de combustible son muy útiles como fuentes de energía en lugares remotos, como por ejemplo naves espaciales, estaciones meteorológicas alejadas, parques grandes, localizaciones rurales, y en ciertos usos militares. Un sistema con celda de combustible que funciona con hidrógeno puede ser compacto, ligero y no tiene piezas móviles importantes.

BIBLIOGRAFÍA

CANALES Margarita y otros. Fisicoquímica. Teoría. Vol 1. UNAM

ROSA DE GUADALUPE Y OTROS. Tecnologías de Hidrógeno Y Celdas de Combustible de Fuentes Renovables.

HOUGEN & WADSON. Principio de los procesos químicos. Reberté