

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

OBTENCION DE HIDROCARBUROS Y
OTROS ENERGETICOS MEDIANTE
PROCESOS BIOSINTETICOS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Q U I M I C O

P R E S E N T A :

MARIA DE LAS NIEVES CARBONELL LEON

MEXICO, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	3
CAPITULO I	
ALTERNATIVAS ENERGETICAS	4
CAPITULO II	
LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGETICO	25
CAPITULO III	
PLANTAS PRODUCTORAS DE HIDROCARBUROS	88
CAPITULO IV	
FOTOSINTESIS ARTIFICIAL PARA LA PRODUCCION DE ENERGETICOS	104
CONCLUSIONES	151
BIBLIOGRAFIA	155

INTRODUCCION

En tiempos remotos, cuando el hombre descubrió el fuego, la principal fuente de energía fue la madera, con ella pudo mejorar sus condiciones de vida, cocinar sus alimentos, iluminar y dar calor a los hogares; con el avance de la humanidad, la demanda fue creciendo y como no bastaba con la materia prima que proporcionaban los ciclos naturales, comenzó la tala de los bosques.

Con la invención de la máquina de vapor por James Watt, en el siglo XIX, se inició la Revolución Industrial, haciéndose necesaria una fuente energética que cubriera la demanda que la madera no alcanzaba a satisfacer; la respuesta se encontró en el carbón.

Posteriormente el desarrollo y proliferación del motor de explosión hizo indispensable la utilización de otros energéticos, como el petróleo y el gas natural, pasando el carbón a un segundo lugar.

El petróleo y los productos afines no comenzaron a explotarse en cantidades significativas hasta 1880. Desde entonces, su producción ha experimentado una tasa de crecimiento casi exponencial; en la actualidad, la energía producida en todo el mundo proviene en un 70 - 80 % de los hidrocarburos. (17)

Tanto el carbón como el petróleo son recursos no renovables, su explotación consiste en ir mermando una cantidad esencialmente fija; su utilización como fuente de energía, supone su destrucción.

Si se comparan los recursos mundiales y las cifras de consumo previstas para el futuro, la cantidad global de energía que se necesitará hasta el año 2 000 equivaldrá al -

10 % de las reservas del combustible, y en el año 2030 el consumo total de energía absorberá el 78 %. De acuerdo con los estudios a largo plazo, 100 años después los recursos se habrán agotado totalmente (3). Previsiones menos moderadas indican que si seguimos extrayendo petróleo y gas natural, llegará el momento, probablemente dentro de 50 años, en que todos los yacimientos estarán vacíos. (16)

Sin embargo, "la preocupación por la energía no renovable no tiene sentido físico sino económico: perderemos la capacidad de disponer de ella, antes de quedar desprovistos" (16). Hace falta trabajo, derivado de la energía, para desarrollar todas las actividades de extracción de crudo. "Cuando el petróleo se consume, se necesitará aún más trabajo para abrir pozos y accionar bombas que aspiren de capacidad vez más raras y cada vez más profundas. Finalmente, se arribará a un punto en que el trabajo requerido para la obtención del petróleo reclamará toda la energía que se pueda generar a partir del propio petróleo extraído. La producción neta de energía es entonces cero, y resulta inútil seguir extrayendo" (16). Antes de que esto ocurra, el petróleo comienza a escasear, los costos de producción aumentan y en consecuencia se incrementa su precio.

Es evidente que el sistema energético actual no basta para satisfacer las necesidades del mañana. Es necesaria la adopción de sistemas nuevos. El momento crucial se producirá alrededor del año 2 000. (3) Si para entonces no se han tomado las medidas necesarias, será demasiado tarde para elaborar y desarrollar tecnologías capaces de satisfacer la urgente demanda de energía del futuro. Es menester, que desde ahora, nos preocupemos por elaborar petróleo y otros energéticos. Y sobre todo, descubrir procedimientos que nos aseguren fuentes de energía renovables y ecológicamente inocuas.

OBJETIVOS

Ante la crisis energética es necesario examinar con objetividad las alternativas de energía actuales, no sólo como opciones prácticas proporcionadas por la tecnología para satisfacer nuestras necesidades, sino también, en su relación con la calidad de vida; estableciendo así, un marco de referencia, en que la energía solar se perfila como el recurso capaz de poner fin a la dependencia hacia las fuentes no renovables.

El estudio de la captura de la energía del sol por las plantas, su almacenamiento en compuestos químicos y el proceso bioquímico de degradación de estos últimos, ha conducido a la investigación de varios métodos para el aprovechamiento de este importante recurso:

- Bioconversión de los carbohidratos a compuestos energéticos.
- Cultivo de plantas productoras de hidrocarburos
- Construcción de sistemas capaces de imitar el proceso fotosintético.

La relevancia del problema energético actual hace indispensable recabar información sobre el desarrollo técnico y la realización de estos tres proyectos, así como, analizar su factibilidad económica, sus consecuencias ambientales, y las ventajas y desventajas con respecto a las demás alternativas energéticas, para finalmente, establecer su viabilidad como opciones prácticas, el lugar que podrán ocupar dentro de las fuentes de energía nuevas y convencionales, y su contribución al desarrollo humano a corto, mediano o largo plazo.

CAPITULO I

ALTERNATIVAS ENERGETICAS

Toda actividad humana, agricultura, industria, transporte, comunicaciones, y nuestra misma supervivencia biológica, depende por completo de la energía.

No es sencillo definir el concepto de energía, sin embargo, conocemos sus efectos y se puede decir que es toda -- causa capaz de producir trabajo. El término energético o -- combustible, hasta hace unos treinta años se utilizaba para denominar a aquellas sustancias que al calentarlas al aire, sufrían ignición espontánea y continuaban quemándose con desprendimiento de calor, el cual podía ser usado para cubrir las necesidades humanas de trabajo; en la ignición, estos -- compuestos se combinaban con oxígeno gaseoso para producir dióxido de carbono y vapor de agua. Con la aparición de las reacciones nucleares ha cambiado la definición de combustible, y es el conjunto de elementos, compuestos, o mezcla de éstos, que interaccionan para producir energía y productos-finales más estables.

La manipulación artificial de la energía ha sido un -- componente esencial de la capacidad del hombre para vivir y desarrollarse. El trabajo es energía empleada en la producción de bienes y servicios que satisfacen las necesidades -- humanas y garantizan un mejor nivel de vida, más allá de las actividades rudimentarias necesarias para la supervivencia. Sin usar energía es imposible producir; el crecimiento de -- la población mundial y las manifestaciones de mayor opulencia en los países desarrollados parecen haber experimentado aumentos significativos paralelos al aumento en el uso de -- energía, existe pues, una relación lineal entre el consumo-

de energía per capita y el producto nacional bruto. (68)

La energía empleada actualmente en los procesos de producción proviene por entero de fuentes no renovables, como el petróleo y el gas natural, que por estar sujetas a la ley de rendimientos decrecientes, inevitablemente aumentarán de precio y tarde o temprano nos enfrentaremos a dificultades económicas graves, y a una reducción en el consumo de energía, en detrimento de la producción y de la calidad de vida.

Un cálculo aproximado del consumo energético mundial es de 6×10^{14} Kwatt por hora al año, en base a una población mundial de 10 000 millones de habitantes. Las tendencias sociales indican que durante las próximas décadas se producirá un aumento en la demanda de energía, que un sistema basado en recursos no renovables, no podrá satisfacer. Es necesario examinar con objetividad las alternativas energéticas proporcionadas por el desarrollo tecnológico, para aumentar la producción de energía, reduciendo al mínimo los problemas sociales y ecológicos que se puedan presentar. La utilización y elección de las fuentes de energía depende de dos factores: los recursos disponibles y la preparación técnica para convertir estos recursos en calor y trabajo.

Las opciones energéticas actuales se pueden dividir en dos grandes grupos;

- Fuentes Renovables
- Fuentes No Renovables

Las fuentes de energía no renovables son por una parte la nuclear, tanto de fisión como de fusión, y por la otra, los combustibles fósiles: carbón, petróleo, pizarras bituminosas, arenas impregnadas de alquitrán, y gas natural.

Las fuentes de energía renovable se dividen en energías solares y no solares; estas últimas, son la energía de las-

mareas y las actuales tecnologías para el aprovechamiento de la energía geotérmica. La energía solar puede ser usada en forma directa, como en la obtención de energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas y en la calefacción ambiental; o en forma indirecta, aprovechando la fuerza de los vientos y de los ríos.

COMBUSTIBLES FOSILES.

Los vegetales, por medio de la fotosíntesis, fijan carbono y almacenan energía solar en forma de carbohidratos, cuyos polímeros constituyen la materia de que está formada la planta; ésta, al morir, se destruye o descompone, liberando energía y produciendo pequeñas cantidades de materia orgánica que se depositan en zonas pantanosas o en otros medios pobres en oxígeno, cuyas condiciones evitan una descomposición microbiana total.

De los compuestos orgánicos producidos antes del período cámbrico, pocos se han conservado; sin embargo, a lo largo de los últimos 600 millones de años, parte de la materia orgánica que no se destruyó inmediatamente, quedó enterrada bajo enormes capas de arenas sedimentarias, fangos y limos; de ahí provienen los combustibles fósiles: carbón, petróleo, gas natural, pizarras bituminosas y arenas impregnadas de alquitrán, que son ricos en energía solar almacenada químicamente. (27)

Su combustión produce bióxido de carbono, el cual, durante su estancia en la atmósfera absorbe poderosamente ciertas bandas infrarrojas del espectro electromagnético. La superficie de la tierra irradia calor al espacio exterior en longitudes de onda infrarrojas. El bióxido de carbono captura parte de la radiación enviada al espacio desde la tierra; la energía captada es radiada de nuevo en dos direc-

ciones: hacia el suelo y hacia el espacio. Por consiguiente, la superficie está protegida contra el frío del espacio exterior, gracias al flujo caliente de la radiación emitida por el bióxido de carbono atmosférico.

El dióxido de carbono atmosférico, es a su vez, absorbido por los mares e incorporado por las plantas, produciéndose así, un equilibrio entre el emitido y el absorbido. La combustión repentina de carbono fijado hace millones de años, ha alterado este equilibrio, produciendo un aumento en la concentración atmosférica, reduciéndose de esta manera la pérdida de calor por la tierra, aumentando por consiguiente su temperatura, lo cual, a través del tiempo puede producir una alteración climática; a este efecto se le denomina "efecto invernadero".

- Petróleo:

El petróleo crudo puede definirse como una mezcla natural de hidrocarburos y sus derivados con nitrógeno y oxígeno. Se encuentra en el subsuelo acompañado de cantidades variables de sustancias como agua, materia inorgánica y gas.

Del petróleo crudo se separan los hidrocarburos, se someten a una destilación fraccionada, seguida de un proceso de refinación (cracking, reforming, isomerización, etc.) y se obtienen los combustibles que actualmente utilizamos, como diesel, gasolina, gasóleo, etc., además de otros productos como grasas, aceites lubricantes y asfaltos.

Gracias a la petroquímica, a partir del petróleo se producen materias primas para la industria de los plásticos, farmacéutica, textil, así como productos necesarios para todas las áreas del consumo humano, como detergentes, shampoos, insecticidas, tintes, pinturas, resinas, hules, etc.

El petróleo es un recurso no renovable, su explotación

consiste en ir agotando progresivamente los mantos petrolíferos; para continuar su producción, se hace necesario emplear técnicas muy caras de prospección y extracción de capas cada vez más profundas y más escasas, así como, perfeccionar los métodos de extracción.

Actualmente mediante la perforación y exploración convencional de pozos petroleros, se extrae un 25 % de petróleo crudo; si se utiliza la recuperación secundaria, que consiste en la inyección de cantidades importantes de agua, puede lograrse la extracción del 50 % del petróleo contenido en el yacimiento; la recuperación terciaria, que consiste en la inyección de catalizadores, hace posible aumentar aún más la recuperación del petróleo; los dos últimos procesos son muy costosos. (14)

La extracción, producción y consumo de combustibles obtenidos del petróleo, da lugar a impactos nocivos al ambiente: aguas de desecho y suelos circundantes a las instalaciones, contaminados de grasas y aceites; derrames accidentales de crudo, escapes en gasoductos. En su combustión se emiten gases tóxicos, como óxidos de azufre y nitrógeno, bióxido de carbono y residuos particulares, además contribuye a la contaminación térmica.

- Gas Natural:

El gas natural está compuesto principalmente por metano acompañado de pequeñas cantidades de etano, propano y nitrógeno -se obtiene por perforación de yacimientos que producen únicamente gas, o como subproducto en la extracción del petróleo.

Se utiliza como materia prima en la industria petroquímica o se convierte en LNG (Gas Natural Licuefacto), que es empleado, principalmente como combustible doméstico; posee tres grandes ventajas: su combustión contamina poco el

medio ambiente, su transporte es sencillo y puede controlarse y distribuirse fácilmente.

- Pizarras Bituminosas y Arenas Impregnadas de Alquitrán:

Otra alternativa en la obtención de hidrocarburos, es la explotación de las pizarras bituminosas y arenas impregnadas de alquitrán, cuyas reservas representan aproximadamente el 2 % de los combustibles fósiles de nuestro planeta. Las pizarras bituminosas contienen alrededor de 100 lbs. -- por tonelada de una sustancia denominada kerógeno, la cual, calentada a 500°C reacciona para producir petróleo y gas. Actualmente se está investigando un proceso denominado de combustión de gas para obtener petróleo crudo sintético. (14)

El costo por unidad de energía producida, en estos procesos de conversión, es muy superior al de la producción convencional de petróleo.

El petróleo se está agotando progresivamente, continuar con su producción -ya sea por explotación de capas -- más profundas, aumentando su recuperación o bien explotando los esquistos bituminosos-, tiene como consecuencia un alza en los costos de producción con su consiguiente aumento de precio en el mercado mundial, junto con el de todos los bienes de consumo, ya que dependemos de él para la producción de energía y materia prima para la mayoría de los procesos industriales.

- Carbon:

Las reservas de carbón mineral representan actualmente el 80 % de los combustibles fósiles de nuestro planeta, sus posibilidades energéticas son seis veces superiores a las del petróleo. (44)

El carbón tiene su origen en plantas fosilizadas desde tiempos prehistóricos, fue formado por la descomposición mpro

biana de materia vegetal en condiciones anaerobias y en presencia de agua estancada. A presión y temperatura muy elevadas, la conversión de lignito (carbón de bajo rango energético) hasta antracita (de alto valor energético), pasando por carbón bituminoso, se lleva a cabo muy lentamente, por varios millones de años. Esta transformación es causada por el desprendimiento de humedad y materia volátil, incrementándose el porcentaje de carbono fijo.

El mineral de carbón está compuesto de carbono e hidrógeno, constituyendo anillos aromáticos condensados de alto peso molecular, y en menor proporción por oxígeno, azufre y nitrógeno, que están formando parte de grupos funcionales como: -OH, -CO, -COOH, -NH₂, -CN, -SH, etc., o como heteroátomos en los ciclos condensados.

La diferencia en composición química entre el carbón mineral y el petróleo crudo, se muestra en la siguiente tabla:

TABLA NUM. 1

%	LIGNITO	C. BITUMINOSO	ANTRACITA	PETROLEO
C	72.7	84.5	93.7	83-87
H	4.2	5.6	2.4	11-14
O	21.3	7.0	2.4	trazas
N	1.2	1.6	0.9	0.2
S	0.6	1.3	0.6	1.0

*(29)

En el siglo pasado, la obtención de calor por combustión directa del carbón, fue la principal fuente energética e impulsó la revolución industrial. A partir de la década de los cincuenta de este siglo, comienza a disminuir el rit

mo de extracción y consumo, mientras el petróleo y el gas natural pasan a ser las principales fuentes energéticas. Sin embargo, ante la crisis energética actual, se ha vuelto a considerar al carbón como fuente de energía debido a sus grandes reservas.

La combustión directa del carbón presenta serias desventajas con respecto a la combustión de productos petrolíferos, como son la emisión de gases y partículas peligrosas e irreductibles, la producción de una gran cantidad de escoria, y además el no poder ser utilizado en forma práctica como combustible para el transporte moderno.

Las perspectivas más amplias para la utilización del carbón como energético, están basadas en la gasificación, tanto subterránea como de superficie, para producir gas metano; o bien en la licuefacción o en la transformación química o biológica, enfocadas principalmente a la manufactura de gasolina y combustibles para el transporte.

El costo, por unidad de energía producida, en los procesos de conversión del carbón, es muy superior al de la producción del petróleo; como resultado, los combustibles sintéticos se deberán vender a precios más elevados a los que actualmente corresponden a los combustibles convencionales. Además, estos procesos están lejos de ser tecnológicamente maduros, y es necesario tomar en cuenta los efectos nocivos al ambiente, en particular la tendencia a producir sustancias carcinogénicas como el benzopireno.

Las reservas de carbón son muy grandes, y están ampliamente distribuidas, sin embargo, éste es un recurso no renovable y su explotación consiste en ir mermando una cantidad inicialmente fija. Su utilización, como fuente energética, supone su destrucción, y su extracción exigirá inversiones materiales considerables, que al irse agotando paulatinamente, se irá haciendo cada vez más costosa. Además supone serios peligros para la salud de los trabajadores y para el medio ambiente. (38)

En México, las principales cuencas carboníferas están en la parte norte del estado de Coahuila, existen también yacimientos de menor importancia en Sonora y Oaxaca; una evaluación realizada en 1976, estimaba las reservas de nuestro país en 840 millones de toneladas. (14) Actualmente la Comisión Federal de Electricidad lleva a cabo un programa carbo-eléctrico, con la instalación de centrales termoeléctricas que utilizan el carbón como combustible.

ENERGIA NUCLEAR:

Desde hace unos cuantos decenios, el hombre ha venido utilizando comercialmente la energía nuclear para obtener una parte de la electricidad que necesita. En 1976, la capacidad instalada alrededor del mundo se elevaba a 79.9 Gigawatts en 187 centrales nucleares. Se calcula que en 1985 equivaldrá aproximadamente al 11.3 % de la capacidad total de producción mundial de electricidad y en el año 2 000 al 20 %. (21)

El aprovechamiento de la energía nuclear se basa en dos procesos: fisión y fusión nuclear. La fisión consiste en la ruptura de un núcleo pesado, cuando absorbe un neutrón; los productos son dos o más núcleos medianos, además de uno o varios neutrones, así como la emisión de energía en forma de rayos γ (gama). La reacción de fisión puede mantenerse mediante el aprovechamiento de unos de los neutrones resultantes para producir otras fisiones, o bien isótopos que al decaer, se convierten en núcleos fisionables. Este proceso se denomina reacción en cadena y constituye el principio de los reactores nucleares. (71)

La fusión nuclear se encuentra aún en la etapa experimental; consiste en fusionar dos núcleos ligeros para formar uno más pesado, cuya masa total es menor que la de los núcleos originales. A pesar de que las ventajas de la fu -

sión sobre la fisión son grandes, existen aún problemas de carácter tecnológico para su uso a escala comercial. (72,24)

Ante la escasez de Uranio (235) utilizado en el proceso de fisión, se han diseñado diversos tipos de reactores que producen más combustible nuclear del que consumen para su funcionamiento, que utilizan el Uranio (238), más abundante en la naturaleza. Los riesgos de operación y la contaminación radiactiva del medio ambiente, son aún impedimentos para su comercialización intensiva. (35)

La mayoría de los reactores que funcionan actualmente, se basan en la fisión del Uranio (235) o uranio enriquecido, obtenido del mineral de dióxido de uranio, que contiene un 0.72 % del isótopo (235), el resto está compuesto por Uranio (238) y trazas de Uranio (234).

Si la energía nuclear se basara solamente en la utilización del Uranio (235), la era de los combustibles nucleares sería muy breve. Con los reactores de autorregeneración, todo el Uranio y Torio existentes en la naturaleza se convierten en combustibles para los reactores de fisión.

La opción más prometedora es la fusión nuclear que utiliza deuterio-deuterio como combustible, el cual puede extraerse de los océanos, con una capacidad de producción de energía 500.000 veces mayor que la obtenida por todos los combustibles fósiles. (38)

La energía nuclear representa actualmente, el único curso que podría suplir completamente al petróleo, si se vencieran los riesgos de operación implícitos en su desarrollo, así como los impedimentos tecnológicos aún existentes. Sin embargo, su uso ha suscitado gran controversia social y política, debido a los problemas que causa al medio ambiente; las repercusiones nocivas se producen en todas las fases de su obtención; desde la extracción y elaboración de -

los elementos combustibles, su transporte, hasta la operación y disposición de los residuos radiactivos obtenidos en todas las etapas del proceso. (21) La contaminación térmica producida por el uso intensivo de la energía nuclear, puede aumentar la temperatura de la tierra y de la atmósfera.

Además, el peligro latente, de que un accidente provoque una contaminación radiactiva grave en las zonas circundantes a una central nuclear, es lo que suscita mayor inquietud y oposición a su establecimiento, por parte del público en general y del estado. Otro problema social de serias repercusiones es que el progreso de la energía nuclear facilitaría, aún más, la proliferación de armas nucleares.

En el contexto actual de México, en que es posible desarrollar a corto plazo, otras alternativas energéticas, como la energía hidráulica, la geotérmica y la solar, no se considera conveniente iniciar la instalación de centrales nucleares y plantas nucleo-eléctricas, por las siguientes razones: el costo de inversión de las plantas nucleares es mayor que para aquellas que utilicen carbón o energía geotérmica; además su instalación, - en las condiciones actuales de desarrollo del país-, produciría una gran dependencia con respecto al extranjero.(14)

ENERGIA GEOTERMICA:

El interior de la corteza terrestre está formado por un cuerpo ígneo magmático, (conjunto de rocas) en estado líquido o próximo a la cristalización, a temperaturas superiores a los 1 000°C, producidas por reacciones de fisión nuclear, es decir, por el decaimiento radiactivo de ciertos minerales en el interior de la tierra, o como resultado de la fricción producida por el choque de placas continentales.

Para que esta energía, que se encuentra en el interior de la tierra, pueda ser extraída del subsuelo, es necesario que el cuerpo ígneo magmático caliente agua almacenada en -

formaciones rocosas permeables o en cavidades que la contengan. El proceso de calentamiento se inicia cuando la roca entra en contacto directo con la masa ígnea, elevando la temperatura del agua que ahí se encuentra depositada; esto ocasiona que el agua empiece a circular, lo que eleva a su vez la temperatura de las arenas que están en contacto con el líquido. Esta interacción entre el cuerpo ígneo, la roca -- permeable, arenas y agua, da lugar a la formación de un yacimiento geotérmico. (13)

Entre las manifestaciones observadas en la superficie de estos yacimientos, se encuentran los manantiales de a---guas termales y sulfurosas, y los geiseres.

Actualmente la energía geotérmica puede ser explotada, mediante el aprovechamiento del agua caliente y el vapor, - producidos por el yacimiento geotérmico; el vapor se utiliza para mover una turbina, la cual acciona un generador de electricidad. (34) El agua caliente (50-90°C), que no puede ser utilizada directamente debido a la gran cantidad de desustancias corrosivas que contiene, pasa a un intercambia-- dor de calor, fabricado con materiales resistentes a la corrósión y se emplea para la calefacción de viviendas.

Se están investigando otras formas para el aprovechamiento de la energía geotérmica a gran escala, que podrían convertirla en un fuente renovable, y consisten en hacer una perforación, por donde se introduce agua a alta presión, para producir una fisura subterránea de varios kilómetros; en un punto alejado, se hace otra perforación que llegue hasta la fisura; posteriormente se introduce agua fría por una de las perforaciones, obteniéndose vapor de agua en la otra, - el cual se utiliza para producir electricidad.

La actividad corrosiva del agua y del vapor de origen- geotérmico, requiere de el uso de materiales resistentes para la construcción de las instalaciones, lo cual, eleva el costo de producción.

La primera planta de producción de electricidad a partir de energía geotérmica, funciona desde 1904 en Italia, y tiene una capacidad instalada de 370 megawatts. En 1973, la potencia eléctrica obtenida a partir de esta fuente energética, alrededor del mundo, ya ascendía a 1 911 megawatts (38) y la potencia no eléctrica de las aguas termales empleadas para calefacción de viviendas, era 6 340 megawatts, la energía geotérmica total utilizada en esa fecha era de 7 500 megawatts.

En México, el potencial geotérmico proporcionado por los yacimientos de Cerro Prieto, B.C., Tulicheck. B.C. y los Azufres, Mich., alcanza un valor de 1 959 Megawatts, por lo que se debe impulsar el aprovechamiento de este recurso energético. (14)

ENERGIA DE LAS MAREAS:

La energía de las mareas tiene su origen en la fuerza gravitacional de la luna, cuyo período cíclico, implica que sea una fuente energética renovable. Se obtiene acumulando agua en una pequeña bahía o estuario, durante la marea alta o pleamar y dejándola escapar, durante la marea baja o baja mar; el movimiento del agua acciona una turbina que con la ayuda de algunos accesorios, convierte esta energía en potencial eléctrico. (62)

Actualmente el kilowatt de energía producida por el oleaje marino es demasiado caro en relación con el obtenido por combustión del petróleo, esto se debe, en parte, a que los costos de producción son muy altos, debido al uso de materiales especiales en la construcción de las instalaciones, para contrarrestar la fuerte acción corrosiva del agua de mar; se espera que con el paso del tiempo, el sistema evolucione y los costos disminuyan.

La generación de energía debida al movimiento del mar es muy pequeña, pero es ideal para abastecer de energía eléctrica a pequeñas poblaciones costeras.

El desarrollo de la energía marina es sólo una forma de contribuir con un conjunto de sistemas que se están estudiando para resolver la crisis energética.

ENERGIA EOLICA:

El uso indirecto de la energía solar mediante el aprovechamiento de la fuerza del viento fue una de las principales fuentes energéticas de la industria postmedieval y desempeñó un papel muy importante en la historia de la tecnología, accionando con molinos numerosas máquinas industriales y agrícolas; hasta que hizo su aparición la máquina de vapor.

En la actualidad, los proyectos son más ambiciosos y consisten en transformar la energía cinética del viento en electricidad, utilizando una turbina impulsada por una hélice, sistema con el cual, es posible obtener rendimientos entre el 60 y el 80 %. Con este fin, en Estados Unidos, se construyó una planta eólica de dos aspas, de 61 metros de diámetro cada una, instaladas sobre una torre de más de 100 metros de altura, que ya produce una potencia eléctrica de 1.5 Megawatts. (5)

La dificultad de aprovechar la fuerza eólica proviene del problema de almacenar la energía. De todas las formas de energía, la del viento es la más variable, la producción dependerá de su velocidad. Es necesario, por tanto, extraer la energía del viento y almacenarla, si se quiere tener una producción estable. La técnica aún no ha desarrollado un sistema práctico de almacenamiento. Un esquema prometedor, es la utilización de la potencia variable producida por un generador eólico, para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, estos gases se podrán almacenar a presión y ser combinados nuevamente en una célula energética, para generar electricidad en forma estable. (69)

Los sistemas de producción de energía que utilizan la potencia del viento son, generalmente, de muy pequeña capacidad, por lo que es necesario integrarlos al sistema eléctrico para que coadyuven en la solución del problema energético.

ENERGIA HIDRAULICA:

El origen físico de la energía hidráulica es la fuerza gravitacional de la tierra, y se renueva continuamente por acción de la energía solar, que al evaporar el agua, permite que ésta se acumule, mediante precipitación pluvial, en depositos naturales elevados sobre la superficie de la tierra. La energía mecánica del agua al caer, hace girar una turbina, que unida directamente a un generador produce energía eléctrica. (24)

Se estima que la capacidad hidroeléctrica total del planeta asciende a 3 000 Megawatts, de los cuales, sólo el 10 % se utiliza actualmente, contribuyendo únicamente con un 2 % a los requerimientos energéticos mundiales. (38)

Las tres zonas del mundo con enorme potencial hidroeléctrico aún sin explotar -Africa, Sudamérica y el Sudeste Asiático- son las menos desarrolladas industrialmente. Existen pues, problemas económicos en el uso extensivo de la energía hidráulica.

Una gran proporción de la energía eléctrica producida actualmente, proviene de los combustibles fósiles, carbón y petróleo; con el previsible agotamiento de éstos y su aumento de precios, se hace necesario el desarrollo de tecnologías encaminadas a un completo aprovechamiento del potencial hidroeléctrico mundial.

ENERGIA SOLAR:

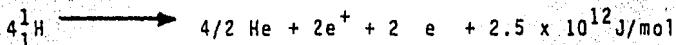
El sol es la fuente de casi toda forma de energía en la tierra: la madera, la fuerza del viento y de los ríos, el trabajo humano y la tracción animal. El carbón y el petróleo son combustibles fósiles, cuya energía proviene del almacenamiento de luz solar en el pasado remoto.

Nuestra estrella, el sol, es una esfera gaseosa de 1.39×10^6 Kilómetros de diámetro, resultado de la condensación de una nube de gas interestelar, bajo su fuerza gravitatoria, que tuvo lugar hace 5×10^9 años; desde entonces a la fecha, sólo ha consumido el 14 % de sus reservas.

El sol no es una esfera homogénea, sino que pueden distinguirse en él, tres regiones principales:

- El núcleo, zona central, donde se genera la energía por medio de reacciones termonucleares; toda la radiación emitida desde esta región es absorbida totalmente por las capas exteriores.
- La fotosfera, que es la superficie visible del sol.
- La Cromósfera y corona solar, que constituyen la atmósfera del sol.

La energía emitida por el sol proviene de una serie de reacciones termonucleares exotérmicas complejas, (ciclo de Bethe), que pueden representarse globalmente:



pero donde de hecho intervienen núcleos de ^7Be y de ^7Li ; -- e^+ es un electrón positivo y e^- es el neutrino electrónico.

La energía en esta serie de reacciones se libera en forma de rayos γ (gama) y se transporta hacia el exterior -

como radiación; en el camino ocurren repetidas absorciones y reemisiones; y va perdiendo gradualmente energía y cambiando hacia longitudes de onda cada vez más largas durante el proceso: primero la radiación, es remplazada por rayos X, luego por rayos ultravioleta, de tal manera, que cuando, finalmente emerge de la superficie solar (fotosfera) lo hace en forma de luz visible y radiación infrarroja. La cromósfera, a su vez, emite en el rango de las radiondas y en el ultravioleta. (58)

La energía luminosa llega a la atmósfera terrestre en forma de radiación infrarroja (51%), luz visible (40%) y pequeñas cantidades de radiación ultravioleta (9%). El ozono atmosférico (O_3) absorbe la radiación ultravioleta, mientras el bióxido de carbono absorbe energía electromagnética en ciertas bandas infrarrojas del espectro, llegando a la superficie de la tierra, únicamente radiación visible y pequeñas cantidades de infrarroja. (27)

El sol suministra a la tierra cerca de 173 billones de Kilowatts (173×10^6 Megawatts), es decir 30 000 veces el consumo total de todos los países industrializados. Aproximadamente un 30 % de la energía solar incidente, es reflejada directamente y enviada otra vez al espacio en forma de radiación de onda corta; otro 47 % es absorbida por la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos, y convertida directamente en calor; el 23 % es consumido en la evaporación, precipitación y circulación superficial de agua en el ciclo hidrológico. Una pequeña fracción: 0.2 % produce las convecciones y circulaciones atmosféricas y oceánicas, disipándose, finalmente, en forma de calor por fricción. -- Por último, una fracción aún más pequeña, aproximadamente del 0.2 %, es capturada por la clorofila de las hojas de las plantas, donde se convierte en el elemento esencial del proceso fotosintético y por consiguiente del reino vegetal y animal. (58)

La enorme magnitud de la radiación solar que llega a -

la superficie de la tierra, es superior a todas las necesidades energéticas previsibles de un mundo industrializado, por lo que representa una meta técnica sumamente atractiva.

Existen dos formas de captar la energía solar: en forma de calor o captación térmica, y en forma de cuantos o -- captación cuántica.

Actualmente, las principales tecnologías para el aprovechamiento del calor producido por la radiación solar son:

- La energía hidráulica y la energía eólica.
- Los sistemas pasivos de climatización o arquitectura solar, que involucran el diseño de construcciones, de tal manera, que se aprovechan al máximo los recursos del medio ambiente.
- Los sistemas de colectores fijos, que transforman la radiación solar en calor, el cual puede ser usado directamente convertido en energía mecánica o eléctrica. Sus aplicaciones son la calefacción ambiental, secado de productos agropecuarios y marítimos, refrigeración, generación de calor para uso doméstico e industrial, etc.
- Los sistemas de colectores móviles, que son diseñados para captar mayor cantidad de energía, al seguir el movimiento del sol; estos sistemas se utilizan en el bombeo y tratamiento de agua, en la preparación de alimentos y en general en la producción de energía mecánica, calor y electricidad.
- Estanques solares: este sistema es un colector y almacén de energía solar en forma de poza, en la que el agua presenta un alto gradiente de salinidad, y pueden ser utilizados para procesos industriales de concentración de sales y para la generación de calor y electricidad.

La captura cuántica de la energía solar consiste en -- captar los pequeños paquetes de energía o cuantos de que está formada la radiación electromagnética. En la actualidad, los principales métodos de captación cuántica son:

- **Sistemas fotovoltaicos:** la celda solar o fotovoltaica es un dispositivo semiconductor que por medio de efecto fotovoltaico convierte directamente la energía solar en electricidad. Para la fabricación de las fotoceldas se utilizan materiales costosos y con una eficiencia en la captación energética muy baja.
- **Sistemas fotoquímicos:** consisten en la conversión y almacenamiento de la energía solar en energía química.
- **Sistemas fotosintéticos:** mediante la clorofila, las plantas absorben parte de la energía solar que incide sobre ellas almacenándola en compuestos químicos, formando la Biomasa; utilizando e imitando este fenómeno de conversión biológica, el hombre intenta aprovechar la energía solar, en la obtención de energéticos alternativos, como alcoholes e hidrógeno, así como llevar a cabo plantaciones de hidrocarburos.

La energía solar es una fuente energética renovable, -- mediante su desarrollo y utilización se pondrá fin a la dependencia hacia las fuentes fósiles no renovables, que producen un continuo aumento de precios de la energía y provocan problemas económicos. La energía solar, además, está en --- consonancia con el medio ambiente, y es fácilmente descentralizable.

El carácter intermitente de esta fuente energética ha impedido su completo desarrollo, es necesario almacenarla, para compensar la variación diaria; la producción de hidrógeno y combustibles alternativos, como alcoholes, así como los hidrocarburos sintetizados por las plantas, son excelentes formas de almacenar la energía solar.

ENERGIA Y CONTAMINACION:

En el siglo pasado los beneficios sociales derivados de los usos de la energía, superaban cualquier objeción --- planteada por su impacto en el medio ambiente. El crecimien

to de la población, ha aumentado el uso intensivo de energéticos, causando un grave deterioro al entorno.

El control de los efectos al medio natural, debidos a la utilización de la energía, constituye una nueva industria, que a su vez, supone una demanda adicional de energía y recursos económicos, que incidirá en su precio final.

Cualquier fuente energética basada en tecnologías nuevas, no probadas, producirá efectos al ambiente, en gran parte desconocidos, que al indentificarse, producirán incrementos en los costos; debidos a los insumos causados por la salvaguarda del ambiente.

Todas las formas de energía que utilizamos actualmente acaban transformándose en calor, produciéndose un aumento en la temperatura de la superficie terrestre y de la atmósfera, lo cual puede causar perturbaciones en el equilibrio térmico, modificando el clima. La contaminación térmica producida por los combustibles fósiles es pequeña comparada a la debida a la energía nuclear. Una ventaja de la energía eólica, hidráulica y de las mareas es que no disipan calor sobrante a la biósfera.

La combustión de los compuestos fósiles, produce siempre, además de otros contaminantes, bióxido de carbono, -- que da lugar al efecto invernadero aumentando la temperatura de la tierra.

La madera era la principal fuente de energía en 1850, - en 1910, el carbón representaba un 75 % de la energía consumida, mientras que la madera descendió hasta un 10 % aproximadamente. En los cincuenta años que transcurrieron entre 1910 y 1960, el carbón cedió su posición mayoritaria al gas natural y al petróleo. En cada etapa del desarrollo histórico el hombre ha dependido de una fuente energética.

En la actualidad, según los recursos estimados, la energía nuclear podría llegar a ser la principal fuente energética a nivel mundial, si pudieran vencerse los riesgos de operación, los efectos nocivos al ambiente, así como, los impedimentos de carácter tecnológico aún existentes, para el desarrollo de los reactores autorregenerables. Sin embargo, los combustibles nucleares, tarde o temprano se agotarán y nuevamente la economía mundial se enfrentará a graves dificultades económicas, debidas al aumento de precios de la energía.

Por lo tanto, la opción más viable, es diversificar nuestras fuentes energéticas, utilizando al máximo todos los recursos renovables disponibles como la energía geotérmica, de las mareas, hidráulica, eólica y especialmente la energía solar, en un sistema energético integrado que se encuentre en armonía con el medio ambiente.

CAPITULO II

LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGETICO

La energía solar es la fuente de energía final de todas las transformaciones biológicas y reacciones bioquímicas en todas las células.

La fotosíntesis, primera etapa del flujo de energía en la biósfera, consiste en la absorción de cuantos de energía radiante por la clorofila y otros pigmentos de las plantas, seguida de la bioconversión de la energía luminosa en energía química, y su utilización en la reducción del bióxido de carbono obtenido de la atmósfera, para formar glucosa y otros compuestos de fotorreducción, ricos en energía química.

La fase siguiente, en el flujo de la energía biológica es la utilización de la energía solar almacenada en los carbohidratos, grasas, etc., por los organismos consumidores o por el mismo organismo productor, oxidándolo en presencia de oxígeno o en forma anaerobia, y obtener así, energía útil para la síntesis de sus propios materiales celulares.

El sol suministra a la tierra 1.7×10^{17} watts de energía, de ésta solamente un 25 % es de una longitud de onda que estimula la fotosíntesis y sólo una fracción de este 25 % es absorbida por los vegetales, que reflejan aproximadamente un 8 % de las longitudes de onda fotosintéticamente activas. De la cantidad de energía solar recibida en la superficie terrestre, sólo entre el 4 y 5 % de la radiación incidente termina almacenada en forma de biomasa, y cerca del 12 % de la energía total recibida como luz visible. (27)

Por lo tanto la energía solar es captada por los eco-

sistemas terrestre y acuático, con una eficiencia del 0.1 % del total recibido, almacenándose en aproximadamente ----- 2×10^{14} kilogramos de biomasa al año.

En la siguiente tabla se muestra la distribución de la biomasa producida por los ecosistemas terrestre y acuático.

TABLA NUM. 2 *

ECOSISTEMA TERRESTRE	10^{14} Kg./año
- Bosques (70%)	
- Praderas y Sabanas (20%)	
- Cultivos Agrícolas (10%)	
ECOSISTEMA ACUATICO	10^{14} Kg. /año
Fitoplancton (90%)	
Macrofitas (10%)	
TOTAL	2×10^{14} Kg./año

*(26)

DEFINICION DE BIOMASA:

La biomasa se define, desde el punto de vista energético -- tico, como "...toda la materia orgánica que existe en la naturaleza (árboles, arbustos, algas marinas, desechos agrícolas, animales, estiércol, etc.,) que sea susceptible de --- transformarse en energía" (61)

CLASIFICACION DE BIOMASA:

La biomasa puede clasificarse en:

-Biomasa primaria: es la que se produce para fines determinados, como alimentación, materia prima para la industria, etc., incluye cultivos agrícolas y forestales, por ejemplo:

maíz, trigo, avena, sorgo, frijol de soya, caña de azúcar, madera, cebada, etc.

- Biomasa secundaria: está compuesta por residuos obtenidos en la elaboración de productos a partir de la biomasa primaria, y tiene menor valor económico; por ejemplo: residuos agrícolas, como paja, carrizo, rastrojos, cáscaras de semillas, bagazo de caña, etc.; y residuos forestales, como aserrín, viruta, y astillas de madera.

- Biomasa terciaria: es producida en menores cantidades y se considera material de desperdicio; la constituyen los desechos agrícolas, forestales, ganaderos, urbanos e industriales. (79)

En la siguiente tabla se muestra la producción anual de diversas formas de biomasa en nuestro país en 1977:

TABLA NUM. 3*
VOLUMENES DE ALGUNOS SUBPRODUCTOS

MATERIAL	MILLONES DE TONELADAS
AGRICOLA: Maíz	6.6
Trigo	2.0
Sorgo	4.5
Arroz	0.1
CANERO: Bagazo	4.2
Melaza	1.2
Cachaza	0.2
Cogollos	2.1
PECUARIO: Bovino	32.8
Porcino	1.1
Avícola	0.2

*(76)

Actualmente, es posible utilizar la biomasa secundaria y terciaria como sustrato en la obtención de energéticos y otros productos, aprovechando mejor los residuos orgánicos, que se derivan directa o indirectamente del sector agropecuario y forestal. De esta manera, lo que antes se consideraba como desperdicio, ahora debe valorarse como materia prima para su aprovechamiento alimentario, energético e industrial.

COMPOSICION QUIMICA DE LA BIOMASA:

La biomasa está compuesta de materias sacaroides como jugos de frutas y melazas; materiales que contienen almidón, como granos de maíz, trigo, etc., raíces y tallos como patata, boniato, etc., que por su alto valor alimenticio e industrial caen dentro de la clasificación de biomasa primaria. El análisis químico de algunos productos considerados como biomasa primaria, por ejemplo, la madera, y la mayor parte de los considerados como biomasa secundaria y terciaria, revela que están compuestos principalmente por materiales lignocelulósicos. Ciertas formas de biomasa contienen otros compuestos orgánicos particulares, por ejemplo, la corteza de los árboles, que contiene gran cantidad de fenoles y otros compuestos aromáticos, el estiércol contiene gran cantidad de proteínas. (79)

Los principales componentes químicos de la biomasa son los siguientes:

Mono y Disacáridos	
Celulosa	} Materiales Lignocelulósicos
Hemicelulosa	
Lignina	
Pectina	
Almidón	

- Celulosa: este compuesto constituye más del 50 % del -- carbono orgánico total presente en la biósfera; la mitad de la energía solar fijada en forma de biomasa se encuentra en la celulosa.

La molecula de celulosa es un polímero formado por unidades de D-Glucosa, unidas entre sí por un enlace glucosídico $\beta(1,4)$, constituyendo cadenas lineales, sin ramificaciones, con un peso molecular entre 300 000 y 500 000, cuya -- estructura es:

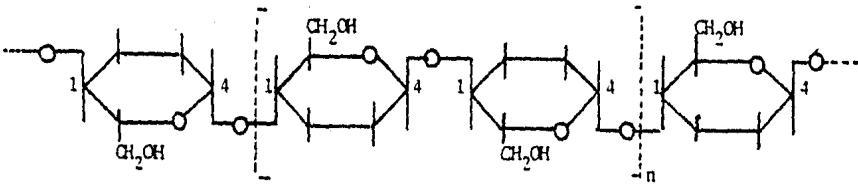


FIGURA NUMERO 1. ESTRUCTURA DE LA CELULOSA.

En la hidrólisis gradual de la celulosa se forma primero hidrocélulosa, después el disacárido celobiosa y finalmente la glucosa.

Las moléculas lineales se encuentran organizadas en haces de cadenas paralelas o fibrillas unidas transversalmente.

mediante enlaces de hidrógeno entre grupos hidroxilo de moléculas adyacentes. La celulosa contiene además regiones -- cristalinas y regiones amórfas, la proporción de cada una -- de ellas depende del tipo de sustrato.

En los vegetales, las cadenas de celulosa se encuentran en una matriz de hemicelulosa y pectina en la pared celular primaria. (47)

- Hemicelulosa: constituye entre el 20 y el 40 % de la -- biomasa; existen varios tipos de hemicelulosa, y en general, pueden definirse como heteropolisacáridos de cadena corta y ramificada, fácilmente hidrolizables, que están compuestos por hexosas como D-Glucosa, D-Manosa, D-Galactosa; por pentosas como D-Xilosa, L-Arabinosa; ácidos urónicos, y otros azúcares.

Las hemicelulosas se clasifican de acuerdo al azúcar presente en la cadena polimérica, la más común es el Xilano, que es un heteropolímero de la D-Xilosa unida mediante enlaces β (1,4) y con cadenas laterales de arabinosa y otros azúcares; otros tipos de hemicelulosa son los mananos, glucanos, galactanos, etc. Exceptuando a las hemicelulosas basadas en la galactosa, que se encuentra unida mediante enlaces β (1,3) la mayoría de ellas posee enlaces β (1,4). (70)

- Lignina: después de la celulosa y la hemicelulosa, es el compuesto más abundante de la tierra, por lo general, -- constituye entre el 10 y el 30 % de la biomasa.

Es el resultado de la polimerización enzimática de alcoholes aromáticos como el transconiferol, el alcohol trans sinapil, y el alcohol transcumaril, entre otros, dando lugar a una estructura muy compleja y resistente a la degradación química y enzimática.

Las estructuras de los principales alcoholes aromáticos así como el porcentaje aproximado con el que se encuentran

formando parte de la lignina de madera, se muestran en la siguiente figura:

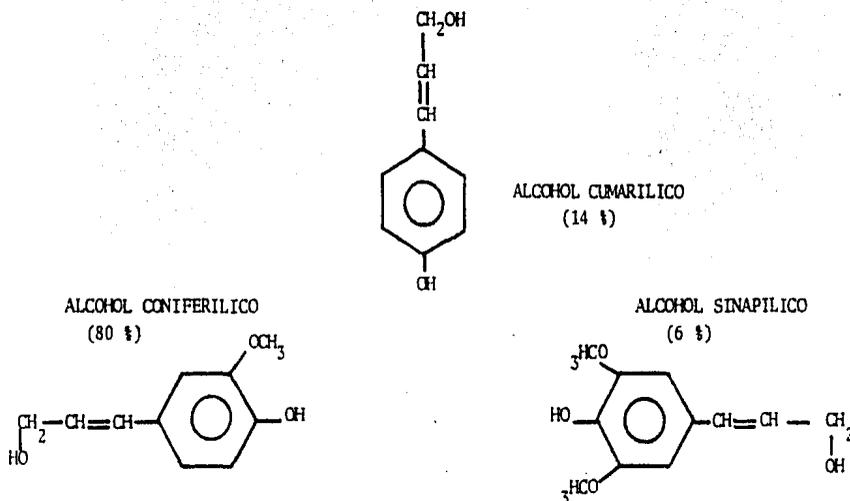


FIGURA NUM. 2 ALCOHOLES AROMATICOS QUE CONSTITUYEN LA LIGNINA DE MADERA, Y SUS PORCENTAJES.

- Pectina: es un heteropolímero de los ácidos glucurónico y galacturónico, unidos por enlaces (1,4); los grupos carboxilo del ácido galacturónico pueden estar metoxilados, el número de sustituyentes metoxilo, depende de su origen. Las pectinas presentes en los materiales lignocelulósicos se encuentran unidas en forma covalente a la hemicelulosa, por enlaces glucosídicos.

- Complejo Lignina Celulosa; la asociación lignina-celulosa, existente en la pared celular de las plantas, constituye uno de los materiales biológicos más resistentes de la naturaleza; sin embargo, a pesar de que la estructura química, tanto de la lignina como la de la celulosa está perfec-

mente determinada, la conformación de la unión entre ellas es aún desconocida.

Existen en la actualidad, tres modelos para explicar la interacción entre la lignina y la celulosa:

- Un enlace químico covalente
- Un enlace de hidrógeno entre los constituyentes
- Incrustación, donde la estructura tridimensional de la lignina, encajona, cubriendo totalmente a la celulosa, impidiendo el acceso de los agentes hidrolíticos.

La explicación más congruente es que la lignina y la celulosa se interpenetran entre sí, uniéndose, tanto por enlaces covalente, como de hidrógeno. (37)

En los materiales lignocelulósicos, la hemicelulosa se encuentra unida a la celulosa por medio de un enlace carbono oxígeno, mientras que la pectina se encuentra unida a la hemicelulosa por un enlace glucosídico.

- Almidón: el almidón es un polímero que funciona como sustancia de reserva en las plantas. Está formado por unidades de glucosa. El almidón se encuentra en dos formas, la α -amilosa y la amilopectina. La primera está constituida por cadenas largas no ramificadas, en las que todas las unidades de D-Glucosa se hallan unidas mediante enlaces glucosídicos α (1,4). La amilopectina está muy ramificada; las ramificaciones se hallan constituidas por unas doce unidades de glucosa y aparecen, por término medio, cada doceavo resto de glucosa. Los enlaces glucosídicos del esqueleto son α (1,4), pero los puntos de ramificación son enlaces α (1,6) (47)

La estructura química del almidón se muestra en la siguiente figura:

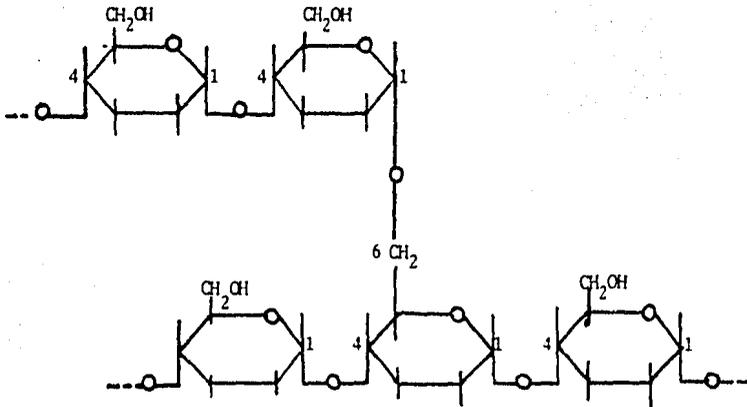


FIGURA NUMERO 3 ESTRUCTURA DEL ALMIDON

El análisis de la composición química de algunas formas de biomasa, se muestra en la tabla número 4, y revela que, exceptuando los granos, la biomasa en general está compuesta, mayoritariamente, por materiales lignocelulósicos.

APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA:

Por medio del proceso fotosintético, la energía solar se almacena en una gran variedad de compuestos, dichos productos constituyen en conjunto el material denominado biomasa, que hasta la fecha ha sido utilizado por el hombre con diversos fines, alimentarios e industriales; antes del advenimiento de los combustibles fósiles, la humanidad cubría sus necesidades de energía con la madera, que es un producto de la fotosíntesis.

TABLA NUM. 4*

ANALISIS QUIMICO DE ALGUNAS ESPECIES DE BIOMASA

MATERIAL	CELULOZA (%)	HEMICELULOZA (%)	LYGNINA (%)	ALMIDON (%)
MAIZ	3	--	1	80
TRIGO	4	--	2	85
CARA DE MAIZ	38	26	19	--
CORTEZA DE ABETO	26	16	15	--
BAGAZO	50	26	20	--
PAJA DE ARROZ	42	23	18	--
CASCARA DE ARROZ	40	26	17	--
TALLO DE YUTE	49	20	21	--
CASCARA DE TRIGO	41	30	20	--
MADERA DURA	60	11	28	--
MADERA SUAVE	53	23	23	--

*(79) (63)

Actualmente, ante la crisis del petróleo, el hombre ha vuelto a poner su atención en la fotosíntesis, como proceso de captación, conversión y almacenamiento de la energía solar, desarrollando biotecnologías para el aprovechamiento integral de todos sus productos, en la obtención de alimentos, forraje para el ganado, abonos para la agricultura, materia prima para la industria, y especialmente energía.

UTILIZACION DE LA BIOMASA EN LA GENERACION DE ENERGIA:

Existen dos formas de aprovechar la biomasa en la generación de energía:

- Combustión Directa
- Transformación de la Biomasa a Combustibles

La combustión de la biomasa, en forma de madera o paja, para la obtención de calor y trabajo, se inició desde hace siglos, sin embargo, el bajo contenido energético, así como, la baja densidad de la biomasa, tal y como se recolecta, determina que no sea adecuada para sustituir a los combustibles tradicionales en las necesidades actuales de la industria y el transporte.

Es necesario, pues, la transformación de la biomasa a combustibles líquidos o gaseosos, con mayor contenido energético, que sean más fáciles de manejar, transportar y almacenar.

Los procesos que llevan a cabo esta conversión se pueden clasificar en:

- Procesos Físicoquímicos
- Procesos Biológicos

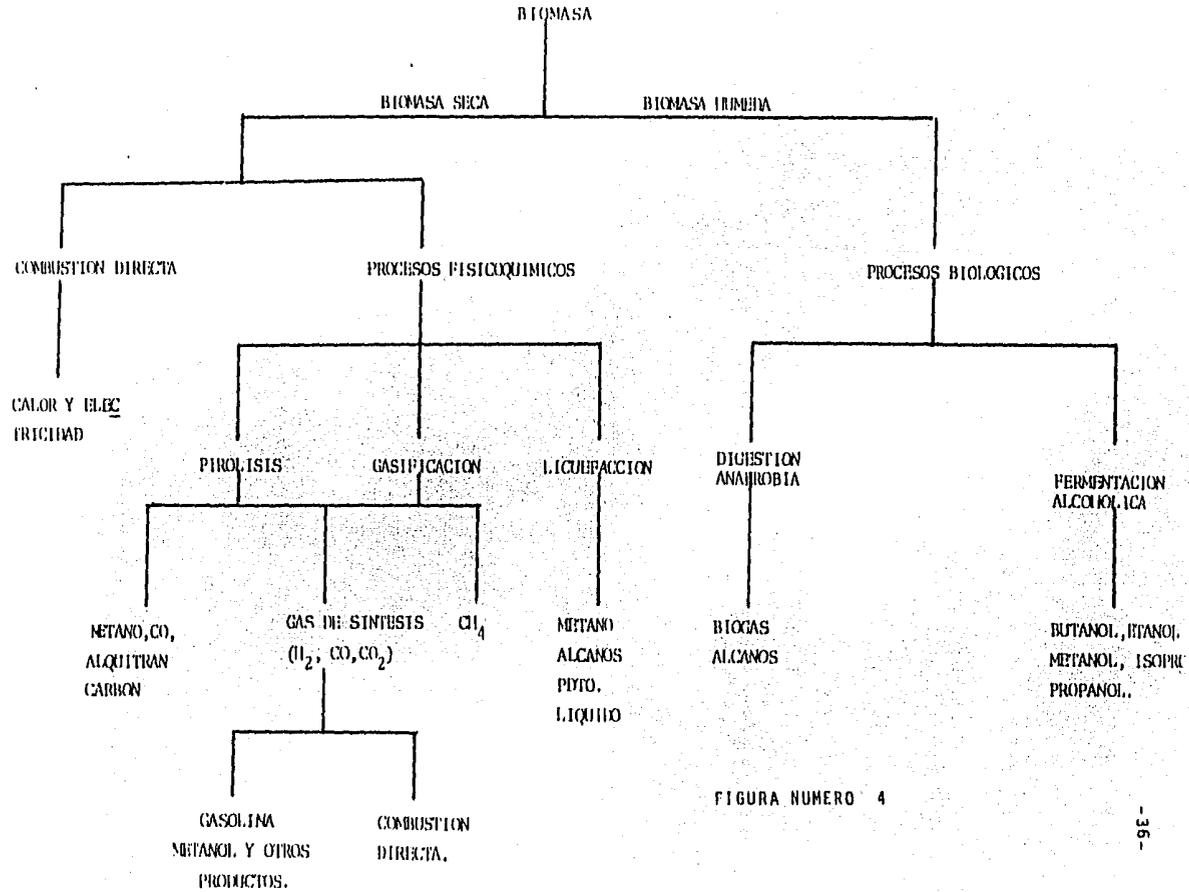


FIGURA NUMERO 4

PROCESOS FISICOQUIMICOS:

- Pirólisis: es un rompimiento térmico y en condiciones anaerobias de los componentes químicos de la biomasa, la cual, es calentada a altas temperaturas, rápida o lentamente; éste es un proceso destructivo, ya que ninguna estructura química del sustrato se conserva.

Los productos que se obtienen son: gases como metano, monóxido de carbono, oxígeno y vapor de agua; líquidos como aceite y alquitrán; y carbón, que en general, son valiosos como combustibles. Se obtiene, además, metanol y ácidos acético y fórmico. Los rendimientos relativos de estos productos dependen de la temperatura, el tiempo de residencia de la biomasa en el pirolizador y de la composición del sustrato.

Los productos gaseosos pueden ser refinados y/o transformados químicamente o biológicamente. El carbón puede generar energía por combustión directa, o someterse a gasificación para producir "gas de síntesis" (CO/H_2), que puede ser fermentado o bien emplearse como materia prima para la industria o utilizarse directamente como combustible. (66,40)

El alquitrán, es un líquido viscoso, de bajo contenido energético, en comparación con el diesel; por lo que se le somete a hidrotreamiento catalítico, para obtener un combustible muy similar al diesel, que puede utilizarse mezclado con él, y así, aumentar su rendimiento. (67,40)

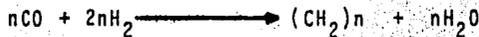
- Gasificación: es la reacción del carbón producido en la pirólisis con vapor de agua, oxígeno, o dióxido de carbono, para producir gas de síntesis. Generalmente gasificación y pirólisis se combinan para incrementar la conversión de la biomasa a productos gaseosos.

Los principales productos de la gasificación acoplada a la pirólisis son metano, monóxido de carbono, dióxido de

carbono, hidrógeno y residuos de alquitrán. (2)

El gas puede ser utilizado para operar motores de --- chispa o diesel, para accionar turbinas, etc. La gasificación puede manipularse de tal manera, que se obtenga gas de síntesis (CO/H_2), a partir del cual se producen una gran -- cantidad de compuestos como metano, metanol, hidrógeno, amoníaco, únicamente eligiendo el catalizador y las condiciones de presión y temperatura adecuadas.

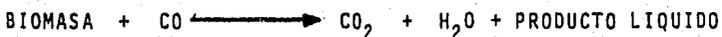
Es posible obtener gasolina mediante la síntesis de -- Fischer-Tropsch, utilizando un catalizador de Hierro-Cobalto, la reacción exotérmica puede representarse:



El gas de síntesis (CO/H_2), obtenido a partir de la -- biomasa, es por tanto, un intermediario muy importante, a -- partir del cual, se pueden obtener una gran cantidad de compuestos valiosos como combustibles o útiles como materia -- prima para la industria. (40)

- Licuefacción: es la reacción de la biomasa con un agente reductor, como monóxido de carbono o hidrógeno, por medio de la cual, es convertida en forma reductiva al estado líquido. (2)

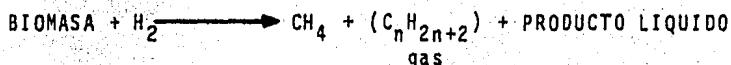
Los productos del proceso utilizando monóxido de carbono, en presencia de un catalizador, son dióxido de carbono, agua y un producto líquido de alto contenido energético, la reacción puede ser representada:



el rendimiento del producto líquido es de 55 a 65 %. El monóxido de carbono que se utiliza, puede ser obtenido mediante el proceso de gasificación, anteriormente mencionado.

Utilizando hidrógeno como agente reductor y un catali-

lizador de Niquel-Raney, se obtiene agua, metano y otros hidrocarburos gaseosos, y un producto líquido aceitoso, cuyo rendimiento es del 26 %. La reacción puede representarse:



El producto líquido de ambas reacciones es muy valioso como combustible, su contenido energético aproximado es de 40 MJ por kilogramo, muy similar al de la gasolina; puede ser utilizado en motores de combustión interna, como combustible para hornos y otros sistemas. Los hidrocarburos gaseosos resultantes, también son empleados en la obtención de energía. (18)

PROCESOS BIOLÓGICOS:

La radiación solar almacenada en los compuestos químicos de la biomasa, es aprovechada por la misma planta o --- por otros organismos, degradando la materia orgánica para obtener energía.

Durante este proceso, denominado de fermentación, algunos microorganismos producen, en ausencia de oxígeno, compuestos orgánicos reducidos como etanol, butanol, metanol, metano, etc., que son valiosos como combustibles.

La conversión de materia renovable a energéticos y productos químicos, por fermentación microbiana o enzimas, es la base de los procesos biológicos.

Un esquema general de la conversión de la biomasa a energéticos, por la vía de fermentación anaerobia, se muestra en la figura número 5. (79)

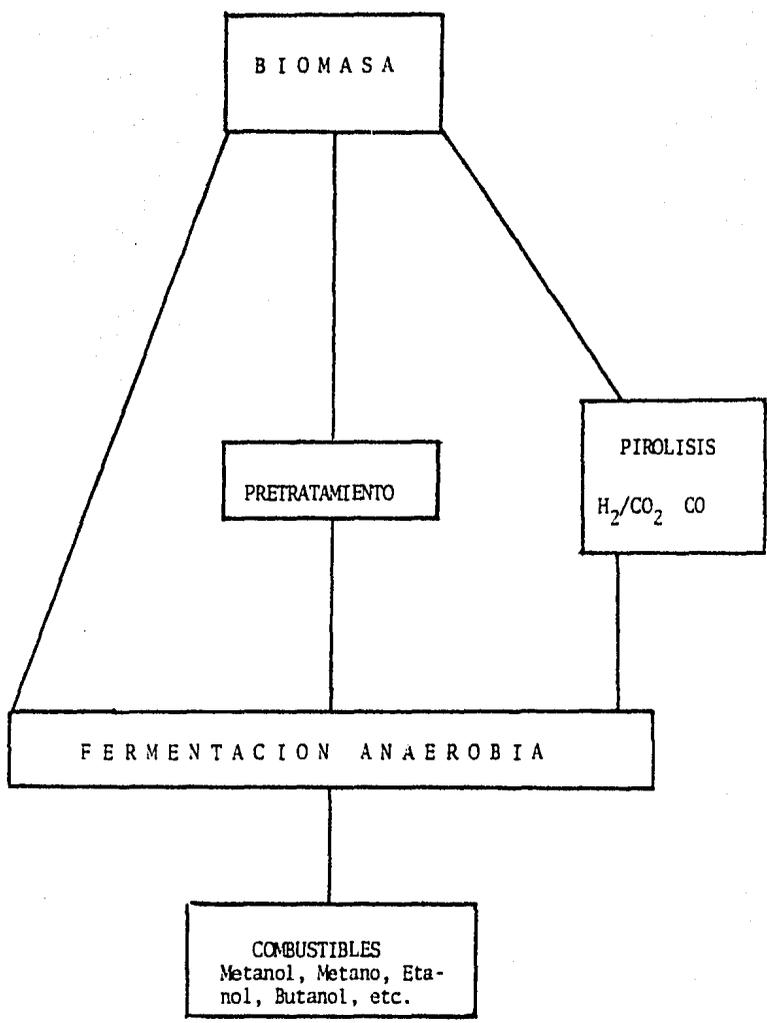


FIGURA NUMERO 5. ESQUEMA GENERAL DE LA CONVERSION DE LA BIOMASA A ENERGETICOS MEDIANTE FERMENTACION ANAEROBIA.

La biomasa puede ser directamente fermentada, como la constituida por almidón, sacarosa, etc., o puede, alternativamente pirolizarse y gasificarse para obtener gas de síntesis (CO/H_2) y posteriormente fermentarse a metanol y otros productos.

Algunas formas de biomasa, como los materiales lignocelulósicos, son resistentes a la acción fermentativa de los microorganismos debido a sus características, las que se enumeran a continuación:

- La naturaleza polimérica de sus componentes, celulosa, hemicelulosa, pectina, etc.

- La celulosa, en los materiales lignocelulósicos, está compuesta por celulosa cristalina y celulosa amorfa, la primera ofrece gran resistencia al ataque químico o microbiano.

- La naturaleza del complejo lignina celulosa, en el que la lignina rodea completamente a la celulosa, formando una barrera que impide, esteáricamente, el acceso de las enzimas microbianas y de los agentes químicos.

- La lignina difiere de otros biopolímeros, en que contiene varios tipos diferentes de enlaces, como carbono-carbono, carbono-oxígeno, β aril eter, etc., por lo tanto no se pueden hidrolizar fácilmente las uniones intermonoméricas, sin condiciones extremadamente oxidantes.

- Son limitados los sitios activos al ataque microbiano, ya que el tamaño promedio de los capilares de la biomasa, es demasiado pequeño, para permitir la entrada de las grandes moléculas enzimáticas, y por lo tanto, su acción está limitada a la superficie. (37,22)

Para hacer posible la fermentación de estos materiales es necesario modificar sus características, mediante uno o varios sistemas de pretratamiento, que aumenten la susceptibilidad de la biomasa a la acción enzimática o microbiana.

SISTEMAS DE PRETRATAMIENTO:

Los sistemas de pretratamiento pueden clasificarse en:

- Sistemas de Pretratamiento Mecánico
- Sistemas de Pretratamiento Físico
- Sistemas de Pretratamiento Químico
- Sistemas de Pretratamiento Enzimático o Microbiano.

- Sistemas de Pretratamiento Mecánico: estos sistemas utilizan el impacto y el corte para producir un sustrato con un tamaño menor de partícula, aumentando así la superficie activa al ataque enzimático, además de reducir el grado de polimerización y el índice de cristalinidad de la celulosa, deformando la red cristalina.

Se ha observado la existencia de una relación aparente, entre el tamaño de partícula y la susceptibilidad del sustrato al ataque microbiano, enzimático o químico: a menor tamaño de partícula, mayor superficie de contacto, y por lo tanto mayor disponibilidad para la acción de los agentes químicos y de las enzimas.

Los principales sistemas utilizados en el pretratamiento mecánico son:

- Molino de Bolas
- Molino de dos Rodillos
- Molino de Martillos
- Molino Coloidal
- Molino Vibratorio
- Sistemas de Extrusión

El uso de un sustrato más fino, permite aumentar la concentración de éste en el proceso y reducir el volumen del reactor. (22)

- Sistemas de Pretratamiento Físico: el pretratamiento -- por radiación, el tratamiento a altas temperaturas y presiones elevadas, y la extracción por solventes, son los sistemas físicos más importantes.

a) Pretratamiento por radiación: estudios realizados - indican que el tratamiento de los materiales lignocelulósicos con rayos γ (gama), da como resultado, la disminución del índice de cristalinidad de la celulosa, la depolimerización de los componentes, incrementando, por tanto, la susceptibilidad del sustrato al ataque enzimático y a la hidrólisis ácida; la cantidad de azúcares reductores producidos, aumenta al aumentar la dosis de la radiación γ , a partir de un límite inferior de 10 Mrad, esta cantidad puede reducirse - al combinar la irradiación, con un pretratamiento químico. - (37)

b) Pretratamiento con vapor y altas temperaturas: este pretratamiento es un método económico, para llevar a cabo - el fraccionamiento de la biomasa, especialmente la compuesta por maderas duras, en sus componentes. Durante el proceso ocurren los siguientes cambios:

- hidrólisis de los grupos acetal de la celulosa, liberándose ácido acético.
- producción de otros ácidos orgánicos en menor cantidad.
- obtención de metanol, al hidrolizarse los grupos metoxilo de la celulosa.

Los ácidos formados catalizan la depolimerización de - la hemicelulosa, produciéndose D-Xilosa y otros azúcares, - solubles en agua, así como la hidrólisis parcial de la lignina, debida al rompimiento de los enlaces β aril eter.

La forma de los cristales de la celulosa no es alterada con el proceso, sino que se incrementa su tamaño y perfección.

Existe depolimerización de la celulosa, la cual es retardada, debido a su naturaleza cristalina.

La temperatura de reacción y el tiempo de residencia - influyen en la distribución y rendimiento de los productos, así como, en el grado de separación de la lignina y la celulosa; la selección de estas condiciones dependerá del uso final de las fracciones.

El proceso IOTECH, tiene como finalidad recuperar glucosa y xilosa, para obtener etanol por fermentación anaerobia, las condiciones óptimas para este proceso son:

- Presión = 500 - 550 psi
- Temperatura = 243 - 329 °C
- tiempo = 40 - 50 seg.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo, en forma simplificada, de este proceso. (53,30)

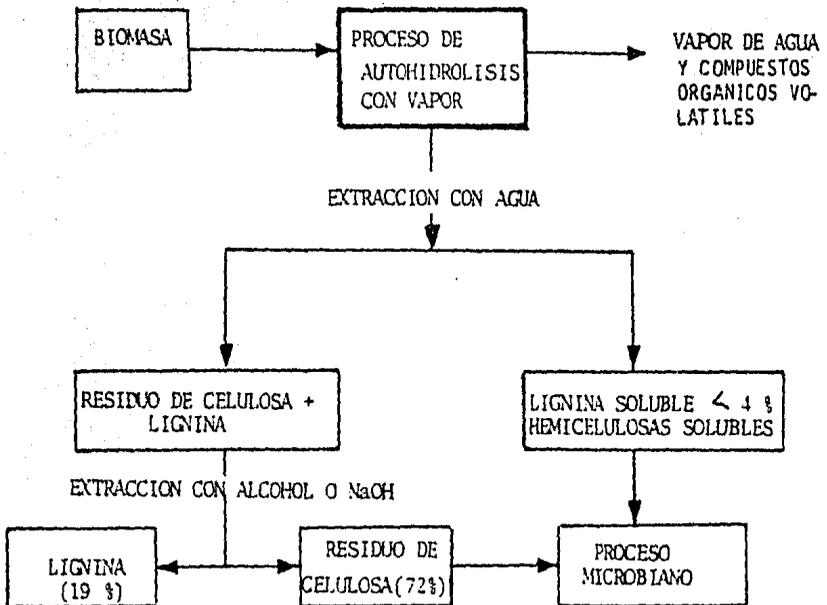


FIGURA NUMERO 6 PROCESO "IOTECH" DE PRETRATAMIENTO

c) Extracción por solventes: es la separación de los componentes de la biomasa al tratarlos con solventes como butanol, fenol-agua, etilenglicol, dietilenglicol, trietilenglicol, etanol, a altas temperaturas; para una delignificación efectiva de la biomasa, se requiere de la presencia de un catalizador ácido. (2)

- Sistemas de Pretratamiento Químico: los agentes químicos utilizados en estos sistemas, pueden clasificarse en: compuestos alcalinos, compuestos que producen hinchamiento de la estructura de la celulosa, sustancias químicas oxidantes, agentes de delignificación y ácido para la hidrólisis de los biopolímeros.

a) Compuestos alcalinos: el tratamiento de los materiales lignocelulósicos con NaOH, causa, además de un hinchamiento en las fibras de la biomasa, un incremento en el área superficial, un decremento en el grado de polimerización, disminución del índice de cristalinidad de la celulosa, desacomplamiento de los enlaces estructurales entre la lignina y los carbohidratos y rompimiento de la estructura de la lignina. Como resultado aumenta la velocidad y rendimiento de la hidrólisis, tanto química, como enzimática. Otro compuesto básico que se utiliza en el pretratamiento de la biomasa es el sulfito de sodio (Na_2SO_3), el cual aumenta la susceptibilidad a la hidrólisis, debido a que remueve la lignina. (28,22)

b) Agentes que provocan el Hinchamiento de las estructuras: la expansión o hinchamiento es un método para modificar la estructura de la celulosa. Algunos reactivos a altas concentraciones ejercen fuerzas de tipo osmótico hacia la estructura intercrystalina de la celulosa, separando las fibrillas que conforman una fibra de celulosa, abriendo así, sistemas de canales que facilitan el acceso a los reactivos químicos y a las enzimas microbianas. Un ejemplo de este sistema es el tratamiento de la biomasa con un solución de cloruro de Zinc (ZnCl_2) al 85 % (37)

c) Agentes Oxidantes: debido a su naturaleza polihídrica la celulosa es susceptible a los agentes oxidantes, los que modifican su estructura. Con la mayoría de los compuestos oxidantes el ataque se lleva a cabo únicamente en la región amorfa, sin embargo, algunos compuestos como los peroxydatos y óxidos de nitrógeno penetran y reaccionan con la celulosa cristalina y también con la amorfa. (37)

d) Agentes de delignificación: los principales agentes de delignificación son: clorito de sodio-ácido acético, dióxido de cloro, y dióxido de azufre. La delignificación es un método efectivo para aumentar la susceptibilidad de la biomasa a la bioconversión. Los dos primeros sistemas, clorito de sodio en solución con ácido acético y el dióxido de cloro solubilizan la lignina, mientras el tratamiento con dióxido de azufre gaseoso a presión y temperatura elevadas rompe el enlace entre la lignina y los carbohidratos. El material lignocelulósico delignificado se conoce como holocelulosa. (37)

e) Hidrólisis Ácida: también conocida como sacarificación química; consiste en romper los polímeros de la celulosa y hemicelulosa para obtener azúcares solubles en agua,-- de cinco y seis átomos de carbono, hidrolizando los enlaces intermonoméricos de la hemicelulosa y los enlaces glucosídicos de la celulosa.

Pueden utilizarse soluciones concentradas de ácidos,-- por ejemplo ácido sulfúrico al 80 % o ácido clorhídrico al 40 % para convertir la biomasa procedente de diversas fuentes vegetales en azúcares; este procedimiento tiene la desventaja de que tiende a degradar a la lignina en forma extensiva, lo que reduce su posterior utilización, limitando la utilidad de este método. (2)

La hidrólisis química también puede llevarse a cabo utilizando ácidos en solución diluida, como por ejemplo: ácido sulfúrico en solución al 0.4 - 1.0 %; este proceso produ

ce bajos rendimientos de sacarificación y además también altera la estructura de la lignina. (2)

Tanto el proceso de hidrólisis que utiliza soluciones concentradas, como el que utiliza soluciones diluidas de ácidos, requieren de uno o varios de los pretratamientos anteriormente mencionados para aumentar la susceptibilidad de la biomasa al ataque ácido y mejorar así, el rendimiento de azúcares monoméricos.

El tratamiento de la biomasa con fluoruro de hidrógeno anhidro, en fase líquida, presenta grandes ventajas en comparación con los otros procesos de hidrólisis o sacarificación química.

La siguiente figura muestra un esquema simplificado del diagrama de flujo del proceso:

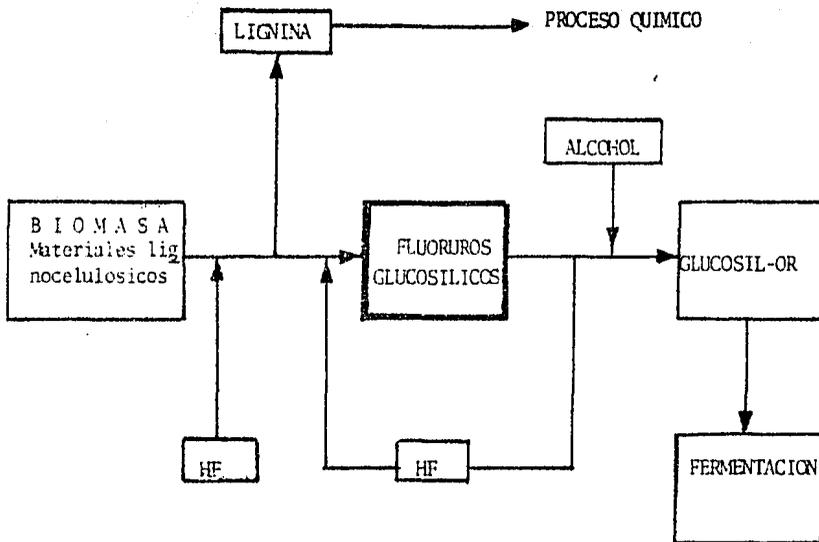


FIGURA NUMERO 7 PRETRATAMIENTO HIDROLITICO UTILIZANDO FLUORURO DE HIDROGENO

Este sistema de pretratamiento presenta altos rendimientos de azúcares monoméricos, sin la degradación de ninguno de los componentes, bajo consumo y facilidad para reciclar y recuperar HF, la lignina libre de fluoruro puede ser utilizada posteriormente como materia prima para la industria, las temperaturas en que el proceso se lleva a cabo son cercanas a la temperatura ambiente, y la ventaja más importante es que no requiere de ningún pretratamiento previo, - excepto, fraccionar mecánicamente la biomasa y secarla. Todas estas características determinan que este método sea superior a las otras técnicas hidrolíticas, inclusive las enzimáticas. (65)

- Sistemas Microbianos y Enzimáticos de Pretratamiento: - los principales sistemas de pretratamiento enzimático y microbiano son: la delignificación de la biomasa utilizando microorganismos la hidrólisis o sacarificación de la biomasa utilizando enzimas producidas por sistemas vivos y la hidrólisis de los biopolímeros por microorganismos que la realicen en forma aislada o acoplada a procesos de fermentación.

a) Delignificación Microbiana: se han hecho gran cantidad de intentos para descomponer la lignina utilizando microorganismos; éste polímero es degradado en la naturaleza por el hongo descomponedor de la madera, perteneciente a los basidiomicetos, la enzima responsable de este proceso es la polifenoloxidasa.

Actualmente se encuentran en investigación otros microorganismos, como el hongo "Pleurotus Ostratus", que degrada tanto la lignina como la celulosa, el microorganismo anaerobio facultativo "C. Pruinosum", especie 7-1, procedente del rumen de animales que degrada lignina y utiliza el ácido siñáptico, como fuente de carbono y energía; el actinomiceto termofílico, "T. fusca", también degrada la lignocelulosa.

A pesar de todas las investigaciones realizadas hasta la fecha, aún no se ha logrado implementar un proceso a ---

gran escala para delignificar a la biomasa biológicamente.
(37)

b) Hidrólisis enzimática o microbiana de biopolímeros: los procesos enzimáticos de depolimerización se llevan a cabo utilizando enzimas o complejos enzimáticos producidos -- por microorganismos, cuyo mecanismo de acción es similar al de la hidrólisis "in vivo".

Los procesos microbiológicos se llevan a cabo utilizando una gran variedad de microorganismos, y de acuerdo a sus resultados se pueden clasificar en dos grandes grupos: (2)

-Procesos que producen únicamente sacarificación o hidrólisis.

-Procesos en que la sacarificación está acoplada a la fermentación y se obtiene alcohol y otros productos.

Las moléculas que constituyen la biomasa son polímeros de alto peso molecular y por lo tanto demasiado grandes para pasar a través de las membranas; para su depolimerización se requieren microorganismos que produzcan enzimas extracelulares que hidrolizen los biopolímeros a sustratos transportables al interior de las células para su catabolismo.

La celulosa, el biopolímero más abundante, es hidrolizado por la celulasa, que es un complejo enzimático formado por varias enzimas, cada una con determinada actividad específica, que actúan sinérgicamente para lograr una efectiva solubilización de la celulosa.

El primer componente del complejo es la endo- β -(1,4)-glucanasa, que actúa rompiendo enlaces glucosídicos al azar; el segundo es la exo- β -(1,4)-glucanasa, que puede actuar o bien como glucohidrolasa, o como celobiohidrolasa, rompiendo terminales reductoras de la cadena de la celulosa; el tercer componente es la celobiasa o β -glucosidasa, que rompe moléculas de celobiosa produciendo glucosa. Las celulasas

son producidas por una gran cantidad de microorganismos, tanto procaríotes como eucaríotes, sin embargo, no todos son capaces de degradar a la celulosa en su forma cristalina. - El hongo "T. resei", así como, algunas bacterias como Celulomonas, Pseudomonas, y Clostridia atacan a la celulosa cristalina. (79)

El xilano es la forma más abundante de Hemicelulosa, - bacterias como el Clostridium Thermocellum, sintetizan enzimas extracitoplásmicas que poseen actividad celulo-lítica y además rompen el xilano.

La hidrólisis microbiana del almidón requiere de la -- presencia de amilasa extracitoplásmica, que es un complejo enzimático formado por α amilasa, que rompe enlaces internos α (1,4), amilogucosidasa, que rompe enlaces externos α -- (1,4) y α (1,6) y una enzima desramificadora que actúa sobre los enlaces α (1,6).

La pectina es hidrolizada por la pectinasa, complejo - enzimático formado por varios componentes, entre los que se encuentra la pectinesterasa, que produce metanol y unidades depolimerasas como transeliminasas y pectinhidrolasas. (79)

Existen microorganismos que pueden solubilizar los biopolímeros y fermentar los azúcares en forma acoplada para - obtener alcohol y otros productos. La bacteria anaerobia -- termofílica Clostridium Thermocellum (LQ8) es capaz de degradar celulosa y fermentarla directamente a etanol produciendo ácido acético, hidrógeno y bióxido de carbono como - subproductos, este microorganismo se desarrolla en celulosa microcristalina a un pH=7.2. Estos procesos tienen la ventaja de llevarse a cabo en sistemas más simples, ya que, operaciones como la producción de enzimas, su recuperación y - la hidrólisis de los biopolímeros no son necesarias. (79,6)

El Clostridium Thermocellum crece muy lentamente en --

los materiales lignocelulósicos, por lo que es necesario un pretratamiento para delignificar el sustrato, el más adecuado en este caso, es el proceso con vapor y temperatura. (6)

Los materiales lignocelulósicos son por naturaleza resistentes al ataque hidrolítico de los microorganismos y de las enzimas, es necesario, por lo tanto, modificar su estructura mediante uno o varios de los pretratamientos antes mencionados, ya que se ha observado que el rendimiento de monosacáridos solubles producidos por hidrólisis microbiana o enzimática aumenta con el grado de delignificación y la superficie activa presentada por el sustrato, y a su vez, disminuye con el grado de cristalinidad de la celulosa. (64)

En la siguiente tabla se muestra la influencia de la lignina en la hidrólisis enzimática o microbiana en diferentes tipos de biomasa.

TABLA NUM. 5*
EFECTO DE LA LIGNINA EN LA HIDROLISIS MICROBIANA
DE DIFERENTES SUSTRATOS

SUSTRATO	LIGNINA/CELULOSA	% DE HIDROLISIS
PAPEL	0 - 0.5	20 - 29
PAJA	0.10 - 0.46	40 - 60
HIERBA	0.08 - 0.2	48 - 90
MADERA	0.3 - 0.6	0 - 40

*(64)

En resumen, la bioconversión de biomasa a combustibles requiere que ésta esté constituida por azúcares solubles fácilmente transportables a través de la membrana al interior de la célula, donde se efectúa el catabolismo, en este caso están el jugo de caña, jugos de frutas, etc.; o que la biomasa sea previamente convertida a ellos mediante hidrólisis

química o enzimática.

Para que esta hidrólisis pueda llevarse a cabo en forma efectiva es necesario que el sustrato sea susceptible al ataque hidrolítico, bien sea ácido o enzimático, como es el caso de materiales amiláceos como raíces y tallos: papa, camote, yuca, etc., o granos como: maíz, trigo, frijol, etc., que requieren únicamente de pretratamiento mecánico para -- disminuir su tamaño; o desechos pecuarios como el estiércol, que solamente se diluye antes de someterlo a hidrólisis.

Madera, aserrín, cáscaras de granos, vainas, paja, rastrojos, etc., son productos vegetales compuestos principalmente por lignocelulosa, que por sus características es muy resistente a la acción química o microbiana, por lo que necesitan ser sometidos a uno o a la combinación de varios -- sistemas de pretratamiento, que actuarán a diferentes niveles; destruyendo el complejo lignina-celulosa, aumentando-- la superficie activa al ataque, reduciendo el índice de --- cristalinidad, y finalmente hidrolizando los biopolímeros.

Como resultado final del pretratamiento se obtienen -- carbohidratos monoméricos de cinco y seis átomos de carbono, disacáridos, trisacáridos, oligosacáridos, lignina, así como residuos de celulosa, hemicelulosa, lignocelulosa, pectina y almidón; la proporción de cada uno de estos componentes dependerá del tipo de sustrato o sustratos que integren la biomasa y del pretratamiento o pretratamientos utilizados.

BIOCONVERSION DE LA BIOMASA, FERMENTACION ANAEROBIA:

Durante la fotosíntesis se producen moléculas energéticas, como carbohidratos, que son degradadas enzimáticamente por el mismo vegetal (autótrofo) o por los organismos consumidores (heterótrofos) y su energía se conserva en forma de energía de enlace fosfato del ATP.

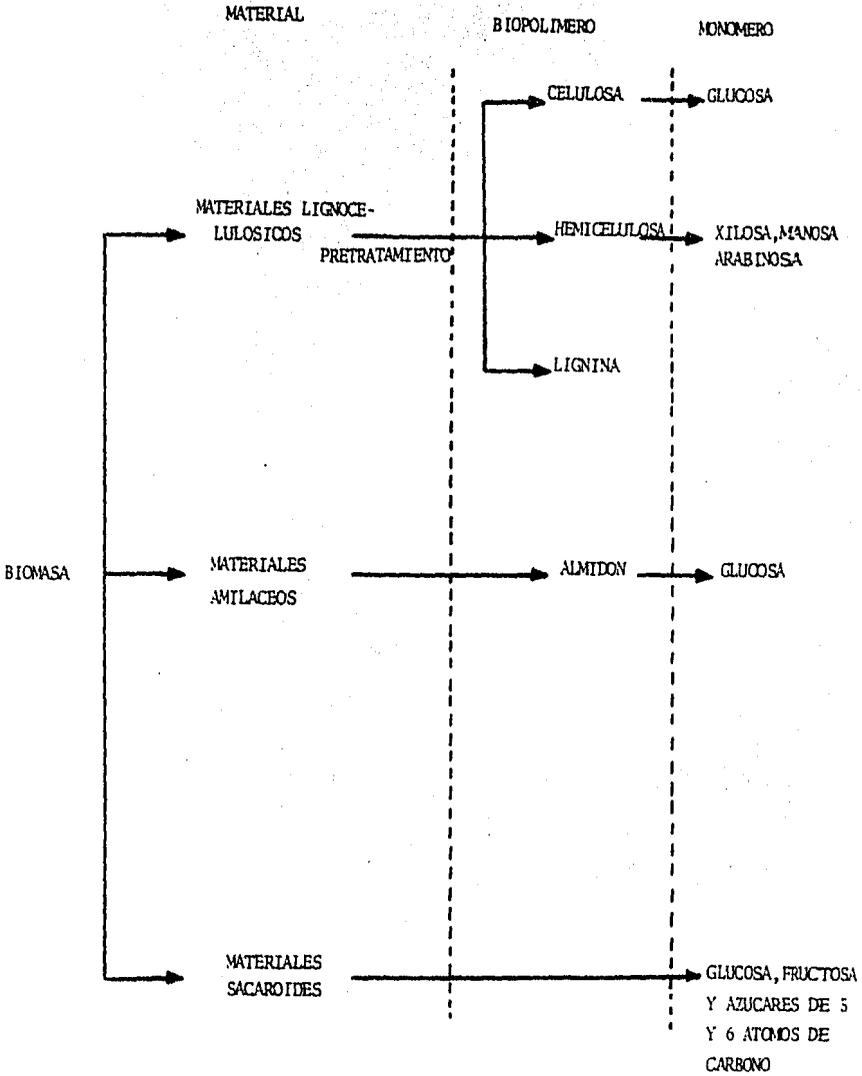


FIGURA NUMERO 8. ESQUEMA GENERAL DE LOS PRODUCTOS DEL PRETRATAMIENTO DE LA BIOMASA

Tanto los organismos autótrofos como los heterótrofos obtienen su energía de las reacciones de oxidación-reducción, es decir, de reacciones en que los electrones --son transferidos desde un compuesto donador electrónico o reductor, hasta un aceptor electrónico o agente oxidante. En los organismos aerobios el oxidante o aceptor final es el oxígeno, mientras que en los anaerobios es una determinada molécula orgánica producida generalmente durante el propio proceso denominada, genéricamente, de fermentación, esto es, la molécula energética se descompone en dos o mas fragmentos, posteriormente, uno de estos fragmentos es oxidado por el otro. (47)

Los sustratos empleados más frecuentemente en las fermentaciones anaerobias son los azúcares de seis átomos de carbono (hexosas), en especial la D-Glucosa; azúcares de cinco átomos de carbono (pentosas), compuestos de uno y dos átomos de carbono como CO_2/H_2 , CO, Metanol, ácido acético, ácido fórmico; algunos microorganismos obtienen su energía induciendo la fermentación de aminoácidos y ácidos grasos.

En la degradación o fermentación anaerobia sólo se libera una pequeña parte de la energía contenida en las moléculas de biomasa, por lo que los productos de la bioconversión contienen una cantidad considerable de energía química potencial, y son susceptibles de ser oxidados en presencia de oxígeno con desprendimiento de energía, razón por la cual pueden ser utilizados como fuente de energía. (47)

Los productos de fermentación anaerobia pueden ser agrupados, como lo muestra la siguiente tabla, en ácidos, solventes y gases. (79)

TABLA NUM. 6
PRODUCTOS DE LA FERMENTACION ANAEROBIA

ACIDOS ORGANICOS	SOLVENTES	GASES
PROPIONICO	ETANOL	METANO
ACETICO	BUTANOL	BIOXIDO DE
FORMICO	ACETONA	CARBONO
LACTICO	ISOPROPANOL	HIDROGENO
SUCCINICO	METANOL	
BUTIRICO	GLICEROL	

*(79)

Los alcoholes, como etanol, butanol, isopropanol, etc., son productos energéticos potencialmente utilizables como combustible; el gas metano o biogas ya se utiliza actualmente como fuente de calor y trabajo junto con otros hidrocarburos gaseosos, en forma de gas natural; el hidrógeno, no puede ser considerado como un producto de fermentación, debido a sus bajos rendimientos, del producto gaseoso resultante, sólo un 3 % corresponde al hidrógeno.

MICROORGANISMOS DE FERMENTACION:

La fermentación es llevada a cabo por tres grandes grupos de microorganismos; levaduras, bacterias y mohos.

Las levaduras han sido ampliamente utilizadas y estudiadas para producción de etanol a partir de materias sacaroides como jugo de caña y jugos de frutas.

El estudio de las bacterias anaeróbicas no facultativas, especialmente de aquellas que se desarrollan en ambientes extremos: ácidos, térmicos, e hipersalinos, ha revelado que poseen características excelentes para la producción de combustibles a partir de biomasa, especialmente las bacte -

terias termofílicas resistentes a altas temperaturas, que poseen mayor velocidad metabólica, enzimas química y físicamente más resistentes, mayores rendimientos, y hacen posible la mayor recuperación de producto a temperaturas elevadas. (79)

Las bacterias anaerobias se pueden clasificar según el producto de su metabolismo en: bacterias solvatogénicas, -- que son las que producen solventes, acidogénicas o productoras de ácidos orgánicos y metanogénicas que producen biogas compuesto principalmente por metano.

Al proceso de obtención de alcoholes por degradación anaerobia se le conoce como Fermentación Alcohólica, mientras a la obtención anaerobia de metano a partir de biomasa se le conoce como Digestión Anaerobia. Sin embargo, ambos procesos son denominados genéricamente: Fermentación Anaerobia.

FERMENTACION ALCOHOLICA:

La fermentación alcohólica es llevada a cabo por dos grandes grupos de microorganismos: bacterias solvatogénicas y levaduras.

Las bacterias pueden ser aerobias o anaerobias. para la bioconversión de la biomasa se utilizan las especies anaerobias, especialmente termofílicas. La mayoría de las especies solvatogénicas producen etanol como producto principal, y metabolizan sustratos como celulosa, celobiosa, almidón y pentosas. Las bacterias como *Clostridium Thermoce* --- *llum* y *C. Thermohidrosulfuricum* son muy importantes debido a que producen enzimas celulasas extracitoplásmicas, mientras que el *Clostridium Thermosaccharolyticum* produce hemi-celulasas extracitoplásmicas. La combinación de ambas especies convierte integralmente los materiales celulósicos a alcoholes como etanol. (79)

Las bacterias anaerobias emplean varias rutas metabólicas para transformar las hexosas como la D-Glucosa, producto de la hidrólisis del almidón o la celulosa, en ácido pirúvico, poder reductor en forma de NADPH y ATP. (19)

Las principales vías metabólicas son:

- Vía metabólica de Embden-Meyerhof-Parnas
- Warburg-Dickens o vía de la hexosa monofosfato.
- Vía de Enter-Doudoroff.

El piruvato, el NADPH y el ATP producidos en estos procesos metabólicos son posteriormente transformados en varios productos como alcoholes y ácidos orgánicos, por diversos caminos enzimáticos que varían de una especie a otra.

La vía metabólica de Embden-Meyerhof-Parnas, también conocida como Glucólisis, es utilizada por la mayoría de las especies bacterianas anaerobias y también es el tipo de descomposición que sufre la glucosa en las células de los animales superiores.

En la primera parte de la glucólisis, la glucosa se fosforila y después se escinde para formar el gliceraldehído-3-fosfato, que en la segunda parte se convierte en ácido pirúvico. La primera fase constituye un proceso preparatorio en el que las hexosas se fosforilan a expensas del ATP, y se colectan en forma de un producto común, gliceraldehído-3-fosfato. La segunda fase constituye la ruta común para todos los azúcares y en ella tienen efecto las reacciones de oxidación-reducción y los mecanismos de conservación de la energía. (47)

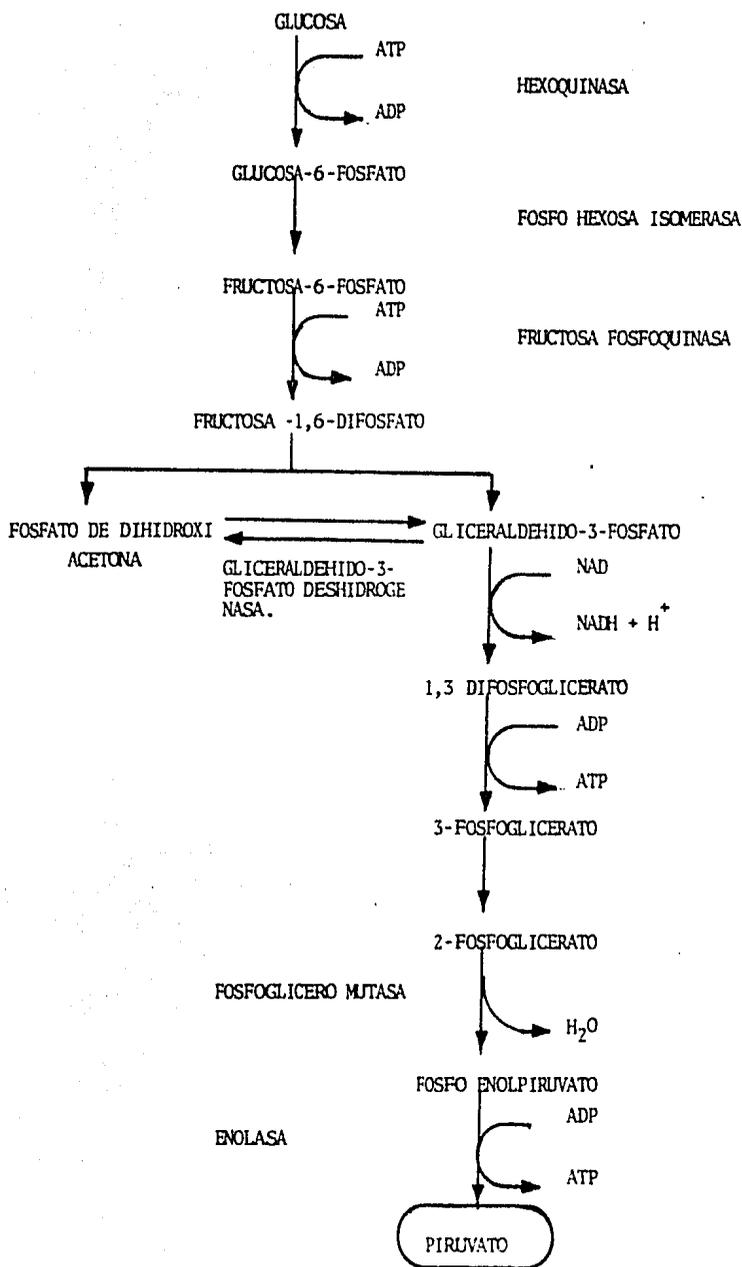


FIGURA NUMERO 9. VIA MATABOLICA DE EMBDEN MEYERHOF PARNAS.

RUJA METABOLICA DE WARBURG DICKENS

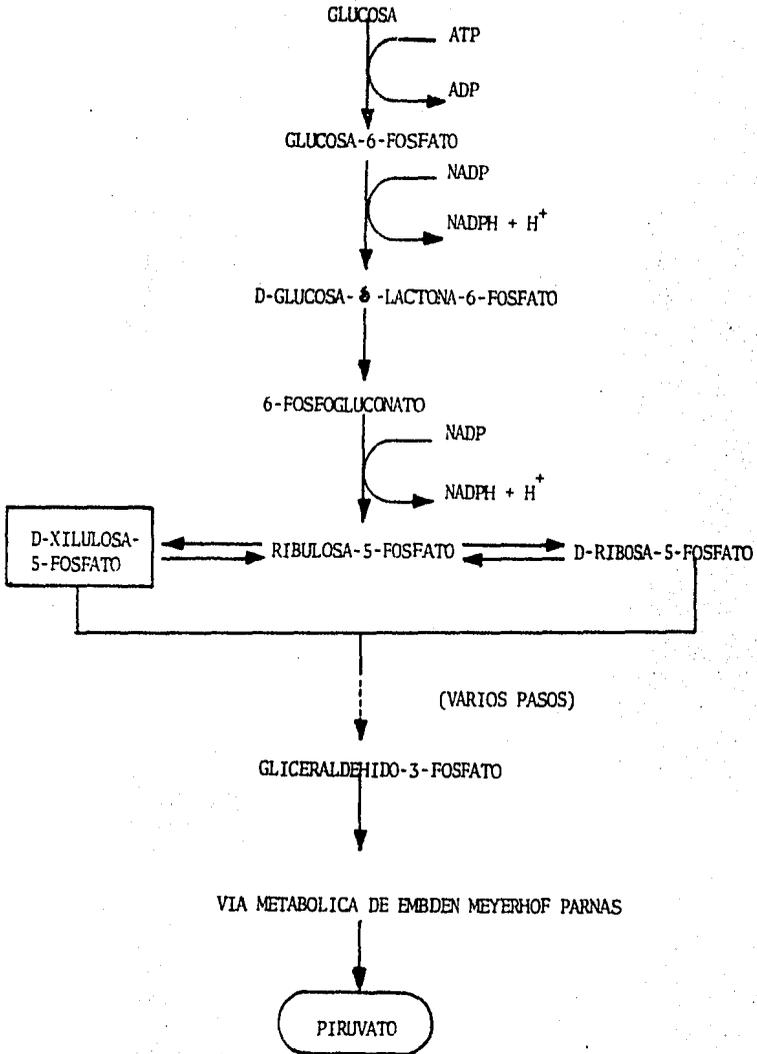


FIGURA NUMERO 10

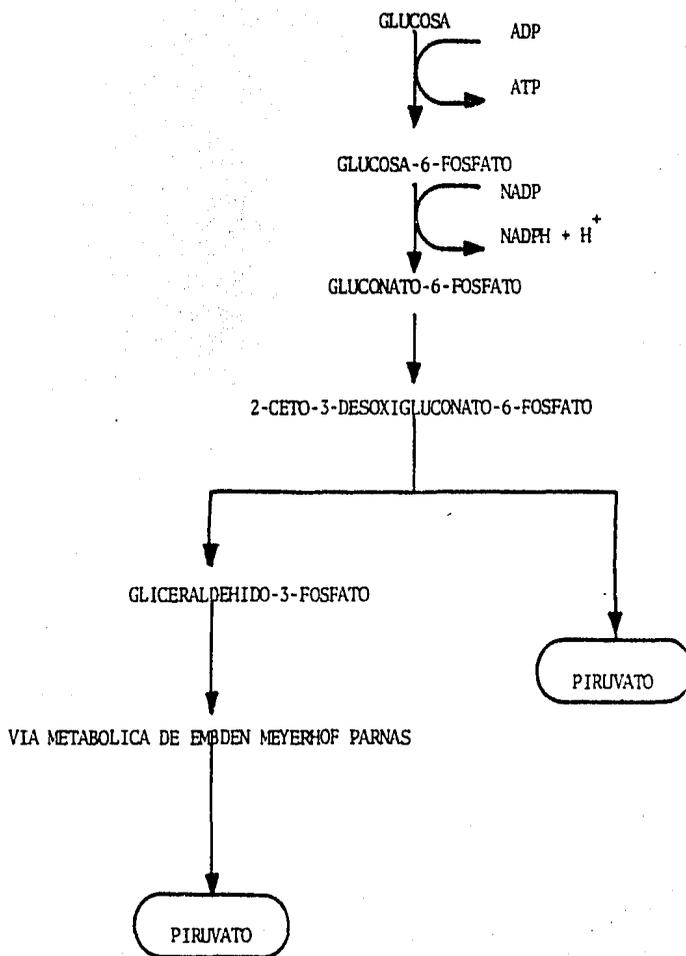


FIGURA NUMERO 11. RUTA METABOLICA DE ENTER DOUDOROFF.

El piruvato, el NADH, o el NADPH, son a su vez transformados en varios productos: etanol y otros alcoholes, ácidos orgánicos, etc., por diversos procesos enzimáticos que varían de una especie a otra. Para la obtención de etanol, las células siguen varias rutas: La Cetoclástica, que produce ácido láctico y etanol, la Fosforoclástica que produce etanol y ácidos acético y láctico, y la ruta Descarboxiclástica, que consiste en la descarboxilación del ácido pirúvico a acetaldehído y su reducción, produciéndose únicamente etanol. Esta última ruta, es por tanto, la más importante, ya que el objetivo es obtener etanol, valioso como combustible. (79)

Las *Zimomonas Mobilis* siguen la ruta descarboxiclástica para la obtención de dos moles de etanol a partir de cada mol de glucosa.

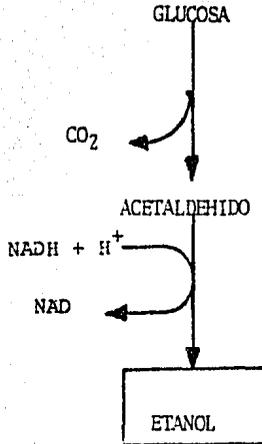
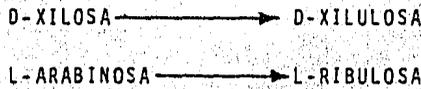


FIGURA NUMERO 12 RUTA DESCARBOXICLASTICA PARA OBTENCION DE ETANOL A PARTIR DE PIRUVATO

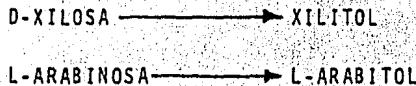
Las pentosas como D-Xilosa, L-Arabinosa, D-Ribosa, etc, derivadas de la hidrólisis de la hemicelulosa, son utilizadas por las bacterias anaerobias para producir etanol.(31)

En la mayoría de las bacterias se da una isomerización directa de aldopentosas a cetosas como primer paso del metabolismo:

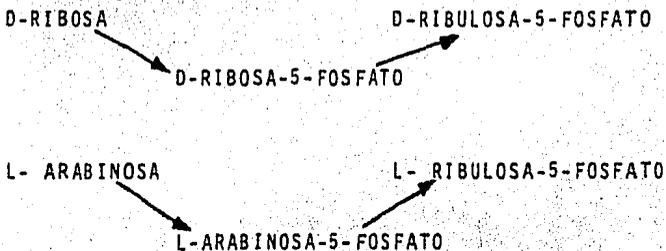


interviene una enzima denominada pentosa-isomerasa.

Otras bacterias como *Enterobacter* sp. y *Corynebacterium* sp. se da como paso inicial una reacción de oxidación-reducción, para producir el alcohol correspondiente:



En otras bacterias se produce fosforilación directa de la pentosa, seguida por una isomerización, interviniendo la enzima pentulo-quinasa.



En el metabolismo de las pentosas la D-Xilulosa-5-Fosfato es un intermediario clave para su conexión con otras rutas metabólicas, y se produce por medio de las reacciones anteriores según el siguiente esquema:

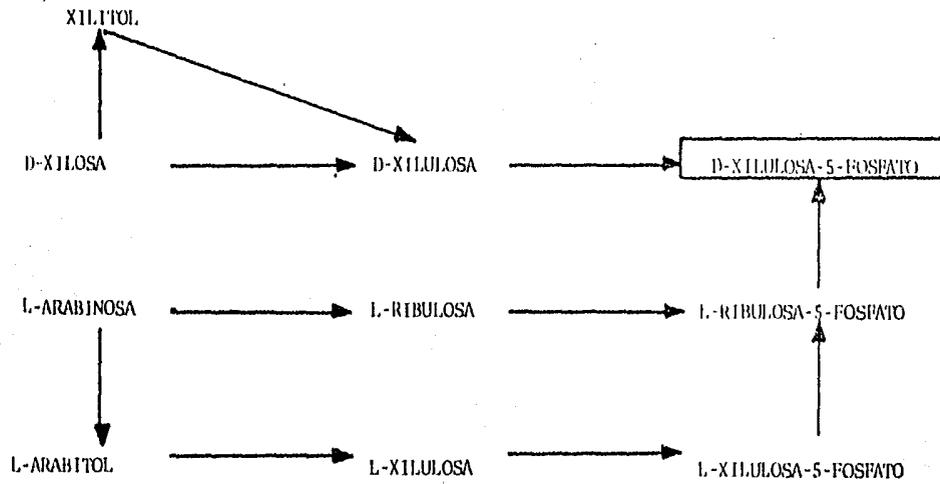


FIGURA NUMERO 13. ESQUEMA DE LA BIOCONVERSION DE LAS PENTOSAS AL INTERMEDIARIO CLAVE D-XILULOSA-5-FOSFATO EN BACTERIAS.

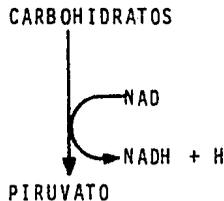
La D-Xilulosa-5-Fosfato, a su vez, se convierte en Gliceraldehido-3-Fosfato, que se conecta a la vía metabólica de Embden-Meyerhof, para producir piruvato y poder reductor en forma de NADH o NADPH; también se conecta con la vía metabólica de Warburg-Dickens y se obtienen los mismos productos.

El piruvato y la Nicotín-amida reducida se convierten a etanol por la vía descarboxilástica.

Bacterias como Aeromonas Hydrofila, Clostridium Thermo saccharolyticum, Klebsiella Pneumoniae, son eficaces en la fermentación de las pentosas a etanol.-(31)

El butanol es otro alcohol que se produce con altos rendimientos en los procesos de fermentación anaerobia por bacterias, sin embargo, siempre se produce en compañía de otros solventes como etano, acetona, isopropanol, etc., El microorganismo denominado Clostridium Acetobutylicum metaboliza sustratos como almidón, hexosas y pentosas, produciendo Butanol y acetona; mientras que el Clostridium Butylicum fermenta hexosas y almidón a butanol e Isopropanol. (79)

El camino metabólico común utilizado por las bacterias productoras de butanol: Clostridium Acetobutylicum y Clostridium Butylicum consiste en la producción de piruvato a partir de carbohidratos por las rutas metabólicas antes mencionadas: (19)



El piruvato se descaboxila para producir AcetilCoenzima A, que se conecta a una ruta metabólica, que es utilizada por un grupo de bacterias solvatogénicas (19)

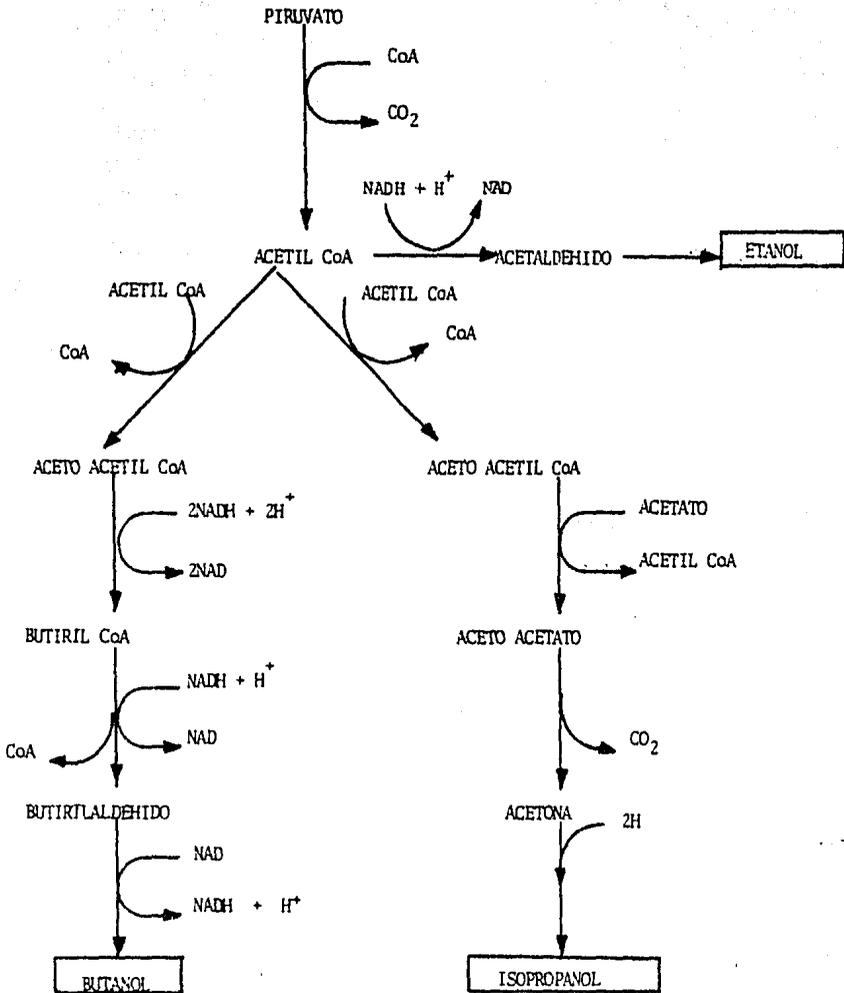


FIGURA NUMERO 14 . ESQUEMA GENERAL DE LA CONVERSION DEL PIRUVATO POR BACTERIAS SOLVATOGENICAS.

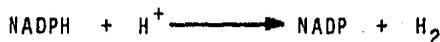
Los productos y los rendimientos de cada uno de ellos, dependerá del sustrato, su concentración, de las condiciones de reacción y de la especie bacteriana utilizada.

El rendimiento de los productos del *Clostridium Acetobutylicum* de los sustratos D-Glucosa y D-Xilosa es similar y se produce: Butanol, acetona y etanol, en una proporción: 6 : 3 : 1 respectivamente. (79)

Las levaduras son hongos gemantes unicelulares y uniu-
cleares, no poseen función fotosintética y se desarrollan -
en la superficie de los frutos. Por espacio de siglos se han
utilizado para la fabricación de bebidas alcohólicas y en la
industria de la panificación. Las levaduras son microorganismos facultativos, esto es, pueden obtener su energía de los compuestos orgánicos en forma aerobia o anaerobia; bajo condiciones anaerobias, los carbohidratos son metabolizados para producir etanol.

Las levaduras son útiles para la conversión de los carbohidratos procedentes de desechos agrícolas compuestos por almidón y materiales lignocelulósicos en general, llevándose a cabo en forma acoplada el proceso de sacarificación y el de fermentación. Estos microorganismos convierten Glucosa a Etanol siguiendo la ruta metabólica de Embden-Meyerhof; poseen una alta velocidad de fermentación, gran tolerancia al alcohol (producto final), altos rendimientos y además no son patógenas.

Las levaduras metabolizan las pentosas convirtiéndolas, primero, a su alcohol correspondiente, mediante una reacción de óxido-reducción catalizada por la enzima aldoreductasa acoplada al sistema:



El alcohol a su vez es convertido a la cetosa correspondiente.

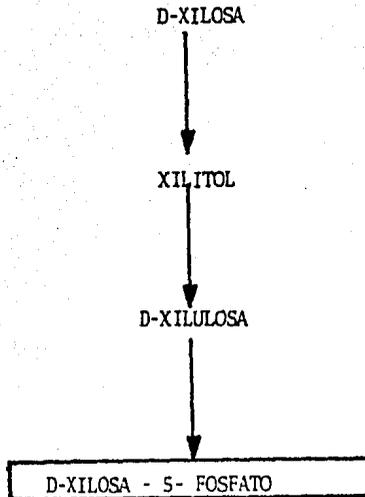


FIGURA NUMERO. 15. ESQUEMA DE LA BIOCONVERSION DE LA XILOSA. AL INTERMEDIARIO CLAVE D-XILOSA-5-FOSFATO EN LEVADURAS.

El alcohol de la D-Xilulosa, Xilitol, es convertido a D-Xilulosa, la cetosa correspondiente en una reacción de oxidación-reducción catalizada por la enzima Xilulosa reductasa, que es dependiente del sistema $NADP^+/NADPH$. A su vez, la D-Xilulosa es fosforilada a D-Xilulosa-5-Fosfato. Al igual que en las bacterias, la D-Xilulosa-5-Fosfato es intermediario clave en el metabolismo de las pentosas por levaduras. La D-Xilulosa-5-Fosfato es convertida a piruvato mediante la vía metabólica de Embden-Meyerhof-Parnas y posteriormente se transforma a etanol. (31,49)

La pentosa L-Arabinosa también es metabolizada por las levaduras, transformándose previamente a D-Xilulosa-5-Fosfato, el cual se conecta al camino metabólico común.

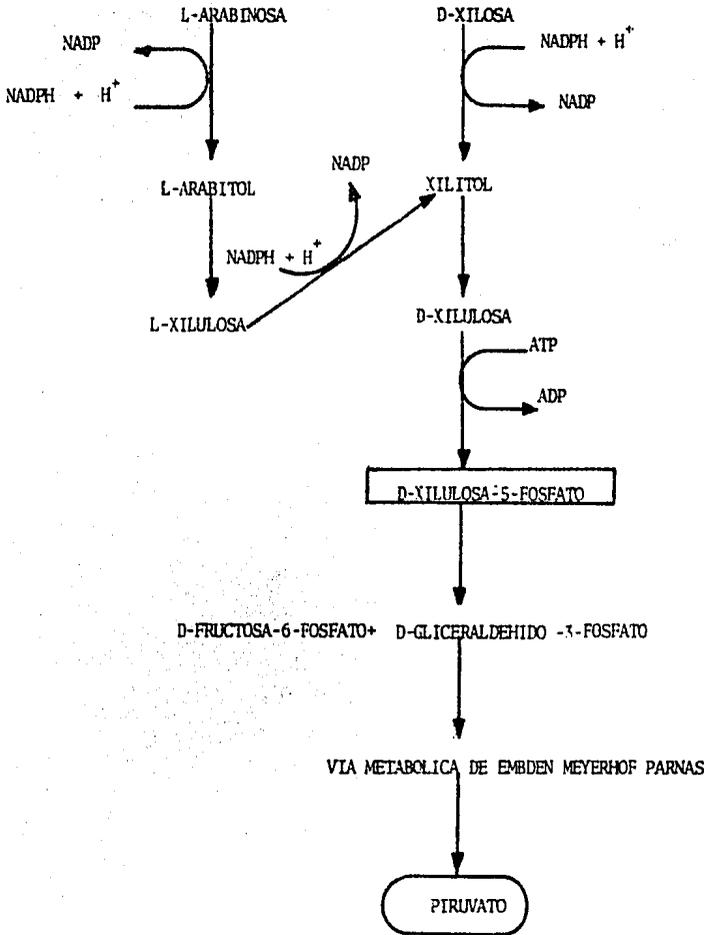


FIGURA NUMERO 16. ESQUEMA GENERAL DEL METABOLISMO DE LAS PENTOSAS POR LAS LEVADURAS

- Proceso de Fermentación Alcohólica: El proceso convencional utilizado para la obtención de etanol y otros alcoholes energéticos a partir de biomasa consta de las siguientes operaciones:

- Pretratamiento
- Producción de Enzimas o del Inóculo
- Fermentación Anaerobia
- Destilación
- Aprovechamiento de los subproductos
- Almacenamiento del producto

El proceso de fermentación que se viene utilizando desde los años cuarenta, consiste en un proceso de flujo intermitente o discontinuo, en que la solución de azúcares es vertida al reactor de fermentación junto con los nutrientes necesarios y se alimenta con el inóculo de levaduras o bacterias, las cuales se multiplican en el reactor, a la vez que producen etanol, la máxima productividad se alcanza después de 20 horas; después de 28 hrs de residencia, el 94 % del azúcar ha sido metabolizado. De ahí se pasa al proceso de destilación, y el reactor se prepara para un nuevo proceso. La destilación es llevada a cabo en varias etapas. (42)

Los sólidos de fermentación pueden ser utilizados como; fertilizante o como alimento para ganado.(52)

DIGESTION ANAEROBIA:

Se denomina digestión anaerobia al conjunto de reacciones enzimáticas y fermentativas que dan como producto final Biogas, que es una mezcla de Metano, Bióxido de Carbono, y otros compuestos gaseosos.

La secuencia bioquímica de este proceso se muestra en la siguiente figura y corresponde a la reacción global, que para el caso de la celulosa es:

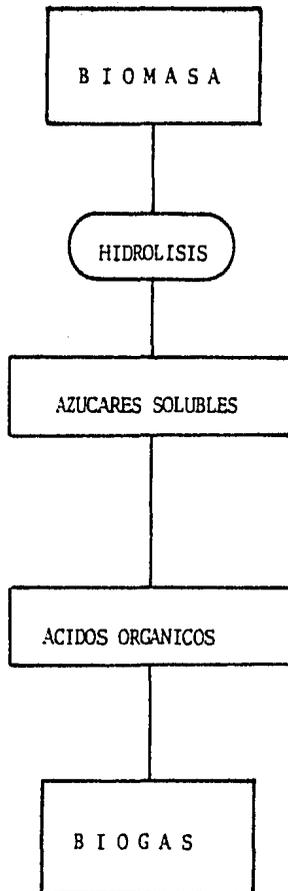
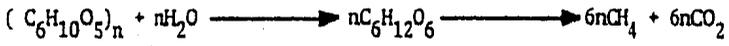


FIGURA NUMERO 17. ESQUEMA GENERAL DE LA DIGESTION ANAEROBIA

Para degradar completamente la biomasa a metano, se utilizan cultivos mixtos integrados por varias poblaciones microbianas, cuyas actividades metabólicas operan en distintos niveles tróficos, esto es, diferentes especies llevan a cabo diferentes reacciones bioquímicas; el resultado final de la combinación de estas reacciones es la producción de metano y bióxido de carbono. Las poblaciones se clasifican de acuerdo a sus funciones en: (25,64)

- Bacterias Hidrolíticas: producen enzimas hidrolíticas extracitoplásmicas (celulasas y xilanasas), que actúan rompiendo las cadenas de polisacáridos en monómeros de glucosa y xilosa. Los dímeros son, a su vez, hidrolizados a monómeros por otras enzimas; los azúcares solubles resultantes son transportados al interior de la célula, donde se fermentan para obtener ácidos acético, fórmico, propiónico, butírico, valérico, láctico, succínico, etanol, hidrógeno y bióxido de carbono.

La efectividad de la hidrólisis enzimática, depende en gran medida, de las características particulares del sustrato, como grado de delignificación, cristalinidad de la celulosa, superficie activa, etc.

- Bacterias Acidogénicas: actúan en forma sinérgica con las bacterias hidrolíticas, compitiendo con ellas por los azúcares solubles para la fermentación; algunos de los productos de las bacterias hidrolíticas, en particular, el ácido succínico, el ácido láctico y el etanol, son metabolizados por los organismos acidogénicos; el ácido láctico y el ácido succínico se convierten a ácido propiónico, mientras que el etanol se oxida, produciendo ácido acético o ácido fórmico, hidrógeno y bióxido de carbono.

Finalmente, la actividad combinada y coordinada de bacterias hidrolíticas y acidogénicas, da como resultado una hidrólisis rápida y eficiente de los polímeros de la biomasa, transformándolos en ácidos alifáticos de cadena corta, como

ácido fórmico, acético, propiónico, hidrógeno y bióxido de carbono, que a su vez, serán degradados por las bacterias metanogénicas.

- Bacterias Metanogénicas: los sustratos más comunes metabolizados por estas especies bacterianas son el ácido acético, fórmico y propiónico, el metanol, el hidrógeno y el bióxido de carbono.

La reducción a metano, requiere de hidrógeno molecular accesible que actúe como donador electrónico, el sistema está acoplado al NADP, que es un transportador de hidrógeno reducido, mientras que los ácidos actúan como donadores de electrones o agentes reductores.

El resultado final del proceso de digestión anaerobia es la producción de biogas, compuesto principalmente por metano, además bióxido de carbono, cuya proporción es menor a la calculada teóricamente, debido a procesos de reabsorción; otro componente es el hidrógeno.

La velocidad de reacción, así como, el rendimiento en la producción de metano por digestión anaeróbica, son mejorados mediante un pretratamiento de la biomasa, que rompa el enlace de los biopolímeros con la lignina y modifique la estructura de la celulosa; también añadiendo enzimas como celulasas y hemicelulasas o mejorando la ecología del digestor, inoculando bacterias que produzcan enzimas hidrolíticas extracitoplásmicas o que conviertan azúcares a productos utilizables por los organismos metanogénicos.

Los residuos sólidos que quedan en el digestor después del proceso son útiles como abono en la agricultura o como aditivo para forrajes.

El proceso de digestión anaerobia ha demostrado ser efectivo en la obtención de biogas a partir de desechos de

la ganadería como estiércol, así como, de la remoción de -- contaminantes orgánicos en aguas de desecho de la industria, especialmente alimenticia, refresquera, azucarera, farmacéutica y vitivinícola. (25,64)

OBTENCION DE ALCANOS POR DIGESTION ANAEROBIA:

Está en investigación un proceso para la producción de alcanos líquidos combustibles a partir de biomasa; consiste de tres etapas:

- Fermentación anaerobia de la biomasa en cultivos mixtos, para obtención de los ácidos orgánicos.
- Extracción líquida de los ácidos orgánicos
- Oxidación electrolítica de las sales de ácidos a alcanos e hidrógeno.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en forma simplificada en la siguiente figura:

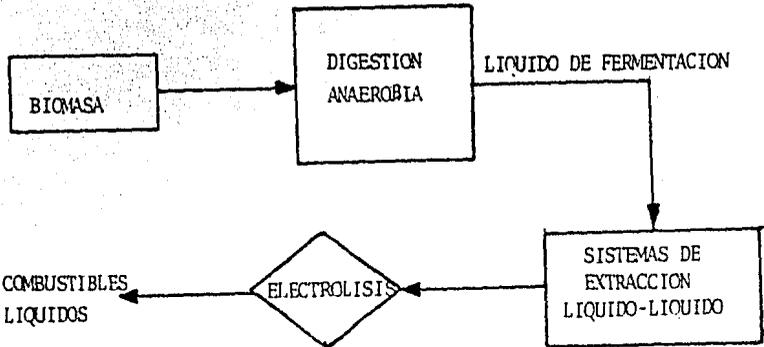


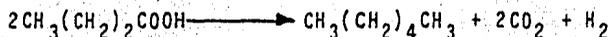
FIGURA NUMERO 18 OBTENCION DE ALCANOS POR DIGESTION ANAEROBIA

En el fermentador se lleva a cabo la conversión de la biomasa a ácidos orgánicos alifáticos, las bacterias acidogénicas producen enzimas hidrolíticas extracelulares capaces de solubilizar los biopolímeros del sustrato; la fermentación es similar a la llevada a cabo en la digestión anaerobia, excepto en que la actividad de las bacterias metanogénicas es reprimida por inhibidores específicos, lo que da como resultado la formación exclusiva de ácidos orgánicos: acético, propiónico, butírico, valérico, caproico, etc.

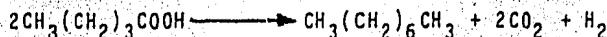
Para recuperar los ácidos, el líquido de fermentación se trata con un solvente orgánico (keroseno), que extrae selectivamente los ácidos de cadena más larga, como el butírico, caproico, valérico, etc. En un segundo sistema de extracción, los ácidos orgánicos son transferidos de la fase orgánica a la fase acuosa por medio de una solución de hidróxido de sodio.

La conversión a alcanos se lleva a cabo mediante una oxidación electrolytica, denominada electrólisis de Kolbe, que consiste en la remoción oxidativa del grupo carboxilo (-COOH) de los ácidos orgánicos y la dimerización del radical alquilo resultante: (48)

- Acido Butirico:



- Acido Valérico:



- Acido Caproico:



⋮

⋮

Otros productos que se obtienen en este proceso son: -

alquenos, alcoholes y esteres.

FERMENTACION ANAEROBIA DEL GAS DE SINTESIS:

La biomasa, al igual que el carbón, puede ser sometido a un proceso de pirólisis y gasificación combinadas, para obtener gas de Síntesis: H_2 , CO, CO_2 , a partir del cual es posible obtener una gran variedad de productos químicos y combustibles; por ejemplo, producir gasolinas mediante la síntesis de Fischer-Tropsch. Otra opción es utilizar el gas de síntesis como sustrato para fermentación anaerobia, utilizando bacterias metanogénicas y producir biogas combustible. Este proceso tiene la desventaja de que parte de la energía de la biomasa se pierde en forma de calor. (79)

PRODUCTOS ENERGETICOS A PARTIR DE BIOMASA:

A partir de la conversión fisicoquímica de la biomasa se obtienen varios productos, con alto contenido energético y potencialmente utilizables como combustibles. Gas de Síntesis (H_2 , CO, CO_2), metano, metanol, alquitrán, en la pirólisis combinada con la gasificación; en la licuefacción se obtiene metano, hidrógeno, dióxido de carbono, hidrocarburos gaseosos y un producto líquido aceitoso de alto valor energético.

Mediante procesos fermentativos se produce, a partir de biomasa, alcoholes como metanol, etanol, butanol e isopropanol, y en la digestión anaerobia se obtienen biogas, rico en contenido de metano y algunos hidrocarburos alifáticos saturados.

- Gas de Síntesis: El gas de síntesis es un producto importante, ya que a partir de él se puede obtener: metano, metanol, hidrocarburos parafínicos, que pueden ser utilizados sustituyendo al diesel; mediante la síntesis de Fischer-Tropsch obtener gasolinas; puede ser utilizado como sustra-

to para digestión anaerobia por las bacterias metanogénicas y producir biogas, con alto contenido de metano.

- Alquitrán: el alquitrán es un material con una composición química muy compleja, que se produce durante la conversión térmica de la biomasa. Ha sido utilizado en la producción de energía por combustión directa, a pesar de ser un producto de bajo contenido energético, viscoso a temperatura ambiente, de que forma lacas con facilidad, no es completamente volátil, es corrosivo, está sujeto a cambios químicos durante el almacenamiento, exhibe un alto contenido de oxígeno y no es miscible con los combustibles convencionales. - (63,67)

Para mejorar sus propiedades y utilizarlo como combustible en forma adecuada, es necesario reducir su viscosidad y el contenido de oxígeno, a la vez, aumentar su volatilidad; con este fin, se le somete a un hidroprocesamiento catalítico, reforming e/o hidrocracking, para obtener una mezcla de hidrocarburos líquidos volátiles, lineales y ramificados, casi idénticos, en composición y peso molecular a los encontrados, tanto en el diesel como en la gasolina.

Este producto tiene la ventaja de que en su obtención se puede emplear cualquier forma de biomasa, inclusive terciaria, y que contiene los mismos hidrocarburos que el petróleo, siendo un sustituto casi perfecto; sin embargo, para los procesos fisicoquímicos de conversión, es necesario, partir de biomasa seca, lo que representa un aumento en los costos.

- Alcoholes: Para sustituir total o parcialmente al petróleo como fuente de energía, es necesario producir combustibles alternativos que posean sus mismas ventajas, y puedan utilizarse en los motores y calderas industriales, así como en el transporte. (32)

Los alcoholes alifáticos ligeros como metano, etanol, propano, butanol, etc., obtenidos a partir de recursos renovables cumplen adecuadamente con los requerimientos del transporte y de la industria moderna; son fáciles de manejar y almacenar, poseen una gran diversidad de aplicaciones, son miscibles en todas proporciones con el agua, debido a la presencia del grupo oxihidrilo (-OH), por lo que los incendios producidos por ellos se extinguen con facilidad utilizando agua, al igual que los hidrocarburos no provocan corrosión en las superficies metálicas, poseen un alto punto de ebullición y de inflamación, lo que garantiza mayor seguridad en el manejo; los vapores de alcohol son poco densos y por lo tanto se dispersan fácil y rápidamente en la atmósfera, por lo que se necesitan mayores concentraciones de vapor para que se inflame al aire. Los alcoholes son hidrocarburos parcialmente oxidados, esto es, su contenido de energía por unidad de peso o de volumen es menor a los derivados del petróleo, como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA NUM. 8*
CONTENIDO ENERGETICO DE LOS ALCOHOLES
EN RELACION CON LA GASOLINA

GASOLINA	40 MJ/Kg	34.5 MJ/lt
METANOL	20 MJ/Kg	16.0 MJ/lt
ETANOL	27 MJ/Kg	21.3 MJ/lt
PROPANOL	30 MJ/Kg	24.8 MJ/lt

*(32)

Hasta la fecha, el etanol ha sido el combustible alternativo más estudiado y utilizado, tanto en su forma anhidra, como en su forma hidratada. (32,52)

El etanol anhidro se utiliza mezclado con los combusti

tibles convencionales, por ejemplo la gasolina, dando lugar al gasohol.

Entre la primera y segunda guerra mundial, el alcohol-mezclado con gasolina en proporciones del 25 % y mayores se utilizó en una gran cantidad de vehículos. A partir de la crisis energética de la década de los setentas, se volvió a poner atención al etanol, especialmente a su producción a partir de recursos renovables. Actualmente las grandes compañías petroleras como Exxon, Amoco y Gulf, han instaurado programas de investigación para la producción y el uso del gasohol y ya comienzan a venderlo. (32)

El Gasohol puede utilizarse en los motores de combustión interna y se han realizado diferentes pruebas llevadas a cabo en vehículos para determinar la influencia del etanol --mezclado con gasolina en: la economía del combustible, el índice de octano y la contaminación al ambiente. Los resultados indicaron que el etanol en mezcla con la gasolina aumenta el índice de octano, y por lo tanto, disminuye su tendencia a producir detonación; aumenta la economía del combustible, disminuyendo el volumen requerido, y también disminuye la emisión de monóxido de carbono, de hidrocarburos, de óxidos de nitrógeno, por lo que coadyuva en el control de la contaminación atmosférica.

En base a estos resultados, es posible afirmar que el etanol en forma anhídrico mejora las características del combustible y por lo tanto es un componente deseable para mezclas con gasolinas que no contienen plomo.

Actualmente se están llevando a cabo pruebas para mezclar etanol con diesel y su utilización en motores, y con gasóleo para ser usado en calderas.

El etanol en su forma hidratada (96 %) se utiliza en motores diseñados para trabajar únicamente con etanol. En Brasil, se han producido aproximadamente 17 000 unidades ve

hiculares que funcionan completamente con etanol hidratado. (8,9,12)

El metanol puede ser utilizado directamente como combustible o ser convertido a hidrocarburos (gasolina) mediante un proceso catalítico. (32)

- Biogas: al someter a la biomasa a una digestión anaerobia se obtiene un producto gaseoso, incoloro e inodoro, denominado biogas, cuya composición depende de la cantidad y tipo de sustrato empleado, así como, de las condiciones del proceso. En la siguiente tabla se muestra la composición más probable del biogas. (76)

TABLA NUM. 9*
COMPOSICION QUIMICA DEL BIOGAS

METANO (CH ₄)	60 - 70 %
BIOXIDO DE CARBONO(CO ₂)	30 - 40 %
HIDROGENO (H ₂)	5 - 10 %
NITROGENO (N ₂)	4 - 6 %
ACIDO SULFURICO(H ₂ S)	trazas

*(76)

A su vez el contenido energético por unidad de volumen depende de la composición, para el caso antes expuesto en la tabla anterior, el contenido energético es de 40 Mjoules por metro cúbico. El aumento en la concentración en el biogas de metano y de hidrógeno aumenta su poder calorífico.

El biogas es un combustible valioso que puede destinarse a uso doméstico, al alumbrado, a la cocción de alimentos en la industria, y a la producción de energía mecánica o eléctrica; el biogas se puede comprimir y ser utilizado en motores diesel o de gasolina, siendo por lo tanto, un almacén eficiente de energía solar. (26)

- Lignina: La lignina obtenida de los materiales y desechos agrícolas es un subproducto que puede utilizarse como energético, por combustión directa, o puede ser convertida a productos químicos de gran valor para la industria como: vainillina, dimetilsulfóxido, catecoles, fenol y sus derivados, benceno y sus derivados, o bien utilizarse en la fabricación de dispersantes, de agentes acomplejantes o reactivos de precipitación coagulantes y estabilizantes de emulsiones, entre otros usos; también puede carbonizarse para obtener carbón activado.

La lignina tiene mayor contenido energético que los carbohidratos debido a que muchos de los átomos de oxígeno han sido eliminados durante su biosíntesis a partir de glucosa, y a que se han formado estructuras aromáticas ricas en energía.

LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGETICO:

La población humana ha experimentado a lo largo de los tiempos un crecimiento primero lento y últimamente explosivo, hasta alcanzar, actualmente, la cifra de 5 mil millones de habitantes, y se calcula que continuará creciendo, si se siguen las tendencias actuales, hasta un total de 10 000 a 15 000 millones de habitantes, donde finalmente deberá estabilizarse. La humanidad tiene necesidades de espacio, alimentos, energéticos, y de otros satisfactores, que van en aumento creciente, y que es preciso satisfacer. (26)

Los productos agrícolas que constituyen la biomasa no pueden ser destinados totalmente a la producción de energéticos, también deben ser utilizadas como alimento para ganado y animales en general, alimento para el hombre, materia-prima para la industria, en la construcción, etc.; aunque la biomasa se destinara únicamente para la producción de energéticos, los factores que intervienen en su producción -

como tierra, agua, se utilizan por el hombre para vivir y--satisfacer todas sus necesidades. Para evaluar la capacidad de la biomasa como recurso energético, es necesario conocer su potencial. (50)

La energía solar que llega a la biósfera es de 3×10^{24} Joule al año, la cual es captada por los vegetales y -convertida en biomasa, con una eficiencia del 0.1 %; actual-mente las reservas de energía solar almacenada en forma de-biomasa asciende a 3×10^{22} Joules o 2×10^{15} kilogramos, -produciéndose 2×10^{14} kilogramos o 3×10^{21} Joule de bioma-sa vegetal, tanto terrestre como acuática, al año.

Si consideramos el consumo energético actual de la hu-manidad como de 3×10^{20} Joules al año, (10^{13} watts al año), observamos que la energía captada y almacenada en forma de-biomasa al año es superior a la energía que el hombre consu-me como tal, en el mismo periodo de tiempo, lo que podría -llevar a pensar que es posible satisfacer las necesidades e-nergéticas de la humanidad a partir de biomasa. Sin embargo, del total producido, 2×10^{14} kilogramos (1.5×10^{21} Joule). se encuentra en los ecosistemas acuáticos, inaccesibles para el hombre, 10^{12} kilogramos al año (1.5×10^{21} Joule) de bio-masa son consumidos por la humanidad como alimento proteico, el resto debe ser utilizado para alimento animal, materia -prima para la industria química, farmacéutica, papelería, etc. y solo una pequeña parte de la energía solar almacenada en -forma de biomasa puede ser utilizada con fines energéticos, mientras las necesidades energéticas de la población son --grandes y van en constante aumento.

Para satisfacer las necesidades alimentarias de la po-blación humana, en constante aumento, y además poder desti-nar una parte a la obtención de energéticos es necesario --planear un uso integrado de este recurso, o cultivando para producir energéticos, esto es, utilizando la biomasa prima-ria, (cultivos agroenergéticos), siendo entonces, muy eleva-do el costo del sustrato y obteniéndose un gran volumen de-energéticos, o bien, hacer uso de los residuos agrícolas o-

biomasa secundaria; y de los desechos ganaderos, municipales e industriales, biomasa terciaria; obteniéndose menor volumen de productos energéticos a bajo costo. Ambas formas de producción deben integrarse en un sistema adaptativo que tenga en cuenta las necesidades alimentarias del hombre y de los animales, y además los requerimientos energéticos e industriales, sin alterar el medio ambiente. (50)

Una alternativa para aumentar la producción anual de biomasa, es utilizar los avances científicos y tecnológicos para incrementar la superficie destinada al cultivo agrícola y forestal, aprovechando los terrenos actualmente improductivos y aumentar, además la productividad de las áreas cultivadas, introduciendo, para este fin nuevas concepciones como:

- Estudiar la fisiología y ecología de las especies elegidas como fuente de biomasa.
- En el caso de la silvicultura, debe cambiarse el sistema de regeneración natural y debe remplazarse por el de regeneración artificial, que permite el uso del mejoramiento genético y otras formas de manejo agrónomico.
- Intensificar la producción, disminuyendo las rotaciones de cultivos.
- Utilizar híbridos y especies genéticamente mejoradas, con lo que se incrementaría la productividad del cultivo.
- Estudiar la reproducción vegetativa utilizando órganos y tejidos para mejorar las especies.
- Investigar los métodos de fertilización para aumentar la productividad, sin alterar el medio ambiente.
- Introducir genéticamente la propiedad de fijar nitrógeno.
- Aumentar y controlar el crecimiento de los vegetales estudiando e introduciendo hormonas específicas.
- Desarrollar invernaderos para cultivar e investigar las especies más idóneas para la producción de biomasa, realizar su estudio genético, conocer sus requerimientos de --

luz, temperatura, minerales, agua, el efecto del bióxido de carbono y las características del suelo, así como, la competencia con otras especies.

- Estudiar la salud de los vegetales, enfermedades, principales plagas que se desarrollan en cada especie, así como, el uso de plaguicidas y pesticidas, sin dañar el medio ambiente.

El cultivo de la biomasa no debe concretarse a la agricultura en la tierra, es necesario implementar la acuicultura:

- Utilizando como fuente de biomasa las hierbas silvestres y flora acuática, como el lirio y el junquillo que predominan en las aguas contaminadas, que en la mayoría de las ocasiones el hombre combate utilizando herbicidas que causan impactos nocivos en el ambiente.

- Explotando el potencial fotosintético de las algas que se desarrollan en la superficie de los cuerpos de agua, por ejemplo, el alga gigante "Macrocystes pyrifera" o las microalgas, ambas extraordinariamente eficientes en la conversión de la energía solar, con altos rendimientos en la producción de biomasa, superiores a los cultivos tradicionales. A partir de ellas es posible obtener alimento humano y para los animales, altamente proteico, materia prima para gran variedad de procesos industriales, además producir metano por medio de digestión anaerobia.

ASPECTOS ECONOMICOS:

La radiación solar es la única fuente energética renovable, inagotable y ecológicamente inocua de que disponemos actualmente, sin embargo, no ha sido utilizada a gran escala debido a su carácter intermitente, disperso y variable; que es necesario contrarrestar almacenándola en compuestos químicos líquidos que puedan ser utilizados como combustible en la transporte y en diversas áreas de la industria moderna.

La luz solar es captada en la fotosíntesis y almacenada en varios tipos de compuestos orgánicos, que constituyen la biomasa, la cual mediante procesos fisicoquímicos y biológicos es transformada a compuestos líquidos ricos en energía.

Actualmente, el costo de producción de energéticos a partir de biomasa es superior al de su producción a partir de fuentes fósiles; es necesario, hacer competitivos los precios de los combustibles de biomasa con respecto a los derivados del petróleo, dejando los métodos tradicionales e investigando otros procesos más económicos, en que se optimicen los rendimientos. Las partes del proceso susceptibles de ser mejoradas aplicando nuevas tecnologías son: (52)

- Producción de biomasa y elección del sustrato
- Tecnologías de fermentación
- Proceso de separación del producto
- Utilización de los subproductos

- Producción de biomasa y elección del sustrato: El costo del sustrato representa aproximadamente entre un 50 y un 60 % del precio final del combustible, el cual incluye el costo de siembra, irrigación recolección transportación, etc.; para alcanzar competitividad en los costos de los combustibles a partir de biomasa es preciso integrar en un sistema adaptativo la producción de energéticos, con la alimentación e industrial, aumentar la productividad de las áreas ya cultivadas, además de extender el cultivo de biomasa a terrenos actualmente improductivos, así como implementar la acuicultura; optimizar la recolección, concentración, transportación y almacén de biomasa.

- Nuevas Tecnologías de Fermentación Anaerobia: El proceso convencional de fermentación alcohólica actualmente utilizado es lento y económicamente ineficiente, por lo que es necesario estudiar el sistema actual y proponer modificaciones que reduzcan los costos de producción:

- Introduciendo fermentadores a presión reducida que permitan que el alcohol se vaya evaporando a medida que se va produciendo, reduciéndose así, la concentración del producto en el cultivo. El alcohol inhibe el crecimiento del microorganismo así como, la bioconversión de las azúcares.

- Implementar el proceso continuo sustituyendo el proceso discontinuo o intermitente, y permitir mayor velocidad y rendimiento de bioconversión, así como el uso de soluciones más concentradas de azúcares.

- Reciclar el cultivo microbiano, aumentando la producción.

- Utilizar sistemas microbianos inmovilizados en soportes gelatinosos, que se usan como empaque en reactores de lecho fijo.

- Si se utilizan materiales celulósicos o lignocelulósicos, previamente delignificados, la tecnología se simplifica si se consolida en uno sólo, los dos procesos, hasta ahora separados de hidrólisis de los biopolímeros y la bioconversión, por lo tanto, es necesario intensificar el estudio de aquellos microorganismos que realizan ambas funciones a la vez.

En la Digestión anaerobia, la velocidad de reacción, así como, el rendimiento en la producción de metano, se incrementa si se añaden al digester enzimas hidrolíticas como celulasas, xilanasas, etc., o mejorando la ecología del digester, inoculando bacterias que produzcan enzimas hidrolíticas extracitoplásmicas o que conviertan los azúcares de la biomasa a productos degradable por los microorganismos metanogénicos. (41)

- Ingeniería Genética: Durante la década anterior se descubrieron enzimas capaces de cortar cadenas de DNA en lugares específicos y otras enzimas capaces de unir los segmentos de cadenas. Con esta técnica es posible combinar segmentos de DNA procedentes de diferentes especies, e introducir este DNA recombinado en células vivas, pasando a formar parte del material genético propio de las células y transmitir-

así, diferentes propiedades a los organismos de generaciones futuras.

Con el advenimiento de la tecnología de recombinación de DNA, se han realizado numerosos esfuerzos para introducir genéticamente propiedades de interés comercial en microorganismos utilizados en el proceso de fermentación. Mediante este proceso es posible:

- Aumentar la tolerancia del microorganismo al producto final de la fermentación, esto es al alcohol.

- Aumentar la resistencia del microorganismo a altas temperaturas, con lo que se facilita la separación de productos directamente por destilación.

- Aumentar los rendimientos del producto o productos requeridos como combustible, si este compuesto o compuestos son producidos acompañados de otros productos o son intermedios del metabolismo microbiano, se utiliza manipulación genética para modificar las enzimas implicadas en el proceso de tal manera, que el compuesto de interés sea el único producto final.

- Introducir genéticamente la producción de enzimas hidrolíticas extracitoplásmicas en microorganismos que ya realizan, con eficiencia, la producción de algún compuesto químico de interés energético.

- Introducir la propiedad al microorganismo de realizar reacciones químicas específicas como hidrogenación, descarboxilación, para producir nuevos compuestos.

- Recuperación del Producto: La separación de productos líquidos del caldo de cultivo de la fermentación es un proceso que requiere de un alto consumo energético, la implementación de un sistema de termocompresión, la utilización de azeótropos y mallas moleculares, así como, el uso de energía solar para abastecer al proceso, son las mejores técnicas y las más prometedoras para ahorrar energía y lograr mayor economía en el proceso.

- Utilización de los Subproductos: La utilización comercial de los subproductos, tanto de la fermentación alcohólica, como de la digestión anaerobia contribuirá a subsidiar los costos de producción.

El residuo que queda en el fermentador o en el digestor es rico en nitrógeno y materia orgánica, por lo que puede ser utilizado como fertilizante o como aditivo para el forraje destinado al alimento del ganado.

Los alcoholes superiores resultantes del proceso de fermentación alcohólica, o "fusel oil"; no deben ser separados del producto final, ya que contribuyen a las cualidades energéticas del mismo. (41)

El bióxido de carbono resultante, tanto en la fermentación alcohólica como de la digestión, puede utilizarse como materia prima en la fabricación de hielo seco.

Si bien, actualmente, el costo de producción de los energéticos a partir de biomasa es superior al de su producción a partir de fuentes fósiles, con las nuevas mejoras a la tecnología de fermentación, la mayor productividad de los cultivos y el incremento de áreas empleadas para la producción de biomasa junto con los recientes avances de la ingeniería genética reducirán los costos de producción de energéticos a partir de biomasa; que a la par con el inminente incremento de los precios de los combustibles fósiles, la obtención de energía por conversión de biomasa será

CAPITULO III

PLANTAS PRODUCTORAS DE HIDROCARBUROS

La mayoría de las plantas verdes almacenan la energía solar, capturada mediante el proceso fotosintético, en forma de carbohidratos y sus biopolímeros, como la celulosa y el almidón; sin embargo, algunas de ellas son capaces de almacenarla en forma de hidrocarburos.

Este hecho es conocido desde el siglo pasado y ha sido comercialmente explotado en la producción de hule natural o caucho, utilizando el "árbol del hule" (Hevea), que produce una sustancia lechosa denominada latex, el cual está compuesto aproximadamente por un 30 % de hidrocarburos en emulsión acuosa; sin embargo, éstos no pueden ser utilizados directamente como combustible, debido a su alto peso molecular.

Existen especies, de la misma familia que el Hevea, que producen hidrocarburos con un peso molecular más cercano a los combustibles extraídos actualmente del petróleo; por lo tanto, es necesario determinar la composición química del latex procedente de varias plantas y su contenido de hidrocarburos; así como conocer las reacciones biosintéticas y los mecanismos de control que permiten a la planta la construcción de hidrocarburos de determinado tamaño.

PROCESO HISTORICO:

Antes de la producción del hule a partir de fracciones del petróleo, el Hevea y el guayule eran la fuente de abastecimiento de este producto para todo el mundo.

El hule fue descubierto en Brasil a principios del siglo XIX en la región del Amazonas. El proceso de vulcanización desarrollado por Goodrich en 1820 hizo del caucho un -

producto agrícola con un alto valor potencial. (12) A finales del siglo pasado aparecen las primeras compañías hule - ras como la Goodyear (1898), la Goodrich (1870), Firestone- (1906), Dunlop (1896), y la Uniroyal (1892); estos gigantes cos consorcios controlan la producción y el consumo mundial de hule natural, utilizándolo principalmente para la produc- ción de llantas; con la expansión de la industria automo- - triz, a principios del siglo XX, se registra un aumento en el consumo mundial; para satisfacer la creciente demanda en el mercado, se inician plantaciones de Hevea en Malasia e - Indonesia, con excelentes resultados, a partir de entonces, la producción de caucho del sureste asiático pasa a ser la- más importante a nivel mundial. (73)

La invasión japonesa a la región en 1941 corta el sumi- nistro de hule a los países aliados; por lo que Estados Uni- dos y Gran Bretaña comienzan la búsqueda de nuevas regiones abastecedoras, así como, de otras especies vegetales produc- toras de hule natural. Científicos de estos países desarrol- lan un proceso de obtención de hule sintético a partir del petróleo, que resulta más económico que su producción agrí- cola. A partir de la terminación de la segunda guerra mun- dial, hasta la década de los setentas, se va sustituyendo - gradualmente el hule natural por el sintético. (73)

Durante la búsqueda de nuevas fuentes de caucho, T.A.- Edison examinó aproximadamente 2 000 especies parecidas al- Hevea, y encontró varias que contenían hidrocarburos, pero- solo dos o tres especies, entre ellas el Guayule, los produ- cían con un peso molecular suficientemente elevado como pa- ra sustituir al Hevea en la producción de hule natural. La- mayoría de las especies analizadas poseían hidrocarburos -- con un peso molecular menor de 20 000, mientras que las plan- tas útiles para la obtención de caucho deben contener hidro- carburos con un peso molecular entre 500 000 y 2 millones(7)

En la década de los setentas el Dr. Melvin Calvin, pre- mio Nobel de Química 1961, al revisar los trabajos de T.A.-

Edison, sugirió la posibilidad de cultivar estos vegetales-capaces de sintetizar hidrocarburos para realizar lo que él certeramente ha llamado "El Cultivo del Petróleo". Con este fin, inició el estudio sistemático de varias especies -- pertenecientes a las Euphorbias y a las Asclepias, investigando los métodos de cultivo y de extracción del latex, analizando el contenido de los hidrocarburos producidos, así -- como los mecanismos biosintéticos que determinan su peso molecular.

Con el reciente desarrollo de la biotecnología en la manipulación genética y transplante de DNA, se abren nuevas posibilidades para la modificación del peso molecular de -- los hidrocarburos, incrementando además su rendimiento.

ESPECIES BIOLÓGICAS:

La planta del hule "Hevea Brasiliensis" produce compuestos que por su elevado peso molecular son muy valiosos-económicamente como elastómeros, (8,9) por lo que se deben buscar otras especies laticíferas (productoras de latex), -- capaces de sintetizar hidrocarburos con un peso molecular -- más cercano a los contenidos en el petróleo.

El 41 % del territorio mexicano tiene características de zona árida, y en él habita el 17 % de la población del país; (15) se denomina zona árida a regiones con menos de -- 25 cms. de precipitación pluvial o con lluvias más copiosas pero con distribución no uniforme dentro del ciclo anual.

El Guayule (*Parthenium Argentatum*), perteneciente a la familia de las Compositae, es una de las especies más típicas y abundantes de las zonas áridas y semiáridas del norte de México; este arbusto produce un latex muy similar en peso molecular al extraído del "Hevea" y es también una importante fuente de hule natural, y por tanto, inconveniente como sustituto del petróleo en la producción de energía.

Sin embargo, existe una gran variedad de especies silvestres, productoras de latex, pertenecientes a la familia de las Euphorbiaceae, denominadas Euphorbias, potencialmente utilizables para la producción de energéticos alternativos; la mayoría vive y se desarrolla en zonas áridas, caracterizándose por su extraordinaria economía en el uso del agua, así como, en su marcada resistencia frente a condiciones ambientales extremas, motivadas por diversos factores ecológicos.(15)

Un excelente candidato para la producción de hidrocarburos es el Euphorbia Lathyris, planta de cultivo anual, -- que alcanza una altura de aproximadamente 1.20 mts., contiene de un 5 a 8 %, de su peso seco, de latex; para obtenerlo es necesario cortar el arbusto, molerlo totalmente y extraer los hidrocarburos con un solvente adecuado.

Actualmente se está experimentando con el Euphorbia Tirucalli en plantaciones al sur de California en USA, éste es un arbusto de 20 a 30 cms. de altura y aproximadamente - 30 cms. de diámetro, es un cultivo anual que produce hidrocarburos de bajo peso molecular, aproximadamente de 10 000.

El Euphorbia Lactea es un árbol de 3 a 5 mts. de altura, muy común en Puerto Rico, el latex se extrae haciendo un corte en la corteza del tronco, y tarda varios años en alcanzar la madurez necesaria para ser aprovechado.

Otros posibles candidatos son: Euphorbia Dendroides y Euphorbia Coerulescens que crecen en forma silvestre en California, Euphorbia Avalois especie muy similar al Euphorbia Tirucalli y el Euphorbia Resinifera que se desarrolla en Marruecos.

Experimentos recientes nos revelan que además de la familia de las Euphorbiaceae, otra familia como la Asclepiaceae y especies individuales de las familias Moraceae y Sapotaceae pueden ser considerados como posibles productores-

de sustitutos del petróleo.(9)

La total domesticación de las especies antes mencionadas y su cultivo en las regiones áridas de nuestro país, es una meta que requiere del desarrollo de técnicas de manejo-agronómico y mejoramiento genético.

FUNCION BIOLOGICA DEL LATEX:

En el árbol del "Hevea Brasiliensis" así como en las plantas de Euphorbias y Asclepias, los hidrocarburos están contenidos en una sustancia de aspecto lechoso, de color blanco o amarillo, denominada latex; éste se encuentra en algunas especies, en células llamadas laticíferas, cuya asociación da lugar a los tubos laticíferos, por donde circula el latex; cuando el tallo de la planta se corta, el latex fluye a presión hacia el exterior. En otras especies, como por ejemplo el guayule, el latex es sintetizado y almacenado en las células parenquimáticas, que son las responsables del almacenamiento de sustancias alimenticias de la planta, para obtenerlo es necesario moler totalmente la planta y traerlo de la mezcla por métodos químicos.

Aún no está bien esclarecida la función biológica del latex, se cree por un lado, que éste participa en los mecanismos de cicatrización de las heridas, sin embargo, el hecho de que se encuentra contenido en las células parenquimáticas, da lugar a la hipótesis de que su presencia está relacionada con el almacen de alimentos y sustancias, o bien, que sea parte del sistema de excreción de desechos de la planta.

ESTRUCTURA Y COMPOSICION QUIMICA DEL LATEX:

El latex es un fluido complejo consistente en una dispersión coloidal de sustancias insolubles en la fase disper

sante (agua), como terpenos, polisoprenos, resinas, carotenos, aceites esenciales, etc. Además contiene azúcares, proteínas, sales minerales de calcio y magnesio, alcaloides, algunos organelos celulares como mitocondrias y microsomas, y biomoléculas específicas para la síntesis de hidrocarburos, por ejemplo: ATP, NADPH, Coenzima A, Acetil Coenzima A y Enzimas. (1)

La composición química del latex ha sido motivo de numerosas investigaciones; a principios de este siglo, Tomás Alva Edison, analizó cualitativamente unas 2 000 muestras procedentes de varias especies vegetales utilizando procedimientos analíticos muy sencillos, como la extracción de la fase dispersa con dos solventes, uno semipolar: Acetona y otro no polar como Benceno; a los compuestos extractables con acetona, Edison los clasificó como resinas, y son moléculas hidrocarbonadas que contienen oxígeno: terpenoles, esteroides, etc. mientras que a los compuestos removidos por el benceno, los llamó "hule" y son los hidrocarburos. La composición química de ambos extractos, así como la de la fase acuosa dispersante está siendo estudiada utilizando métodos más sofisticados, como por ejemplo: Cromatografía de Gases, Espectroscopía de Masas e Infrarrojo, etc. (7)

El peso molecular de los compuestos extractables con benceno es la propiedad que determina la utilidad del latex como fuente energética; sin embargo, no es propio hablar de un peso molecular, ya que no todos los hidrocarburos son del mismo tamaño, sino que encontramos toda una gama de ellos en distintas proporciones, lo que da lugar a una distribución de pesos moleculares, la cual ha sido perfectamente establecida en muestras procedentes de varias Euphorbias, gracias a la cromatografía por permeación de gel.

En el siguiente cromatograma se muestra la distribución de pesos moleculares de extractos del latex procedente del Euphorbia Tirucalli, y se compara con la distribución bimodal presentada por el "Hevea Brasiliensis". (9)

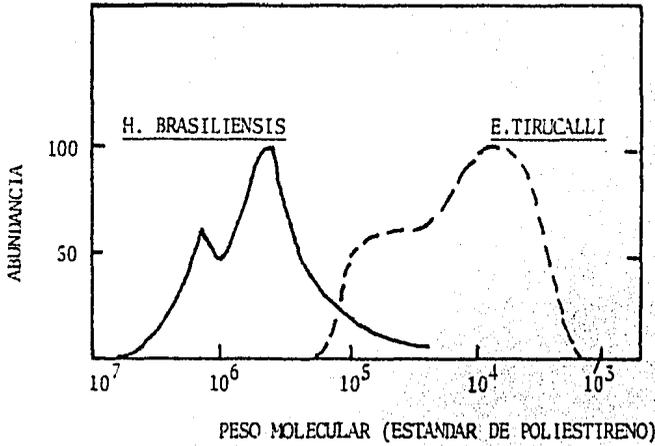
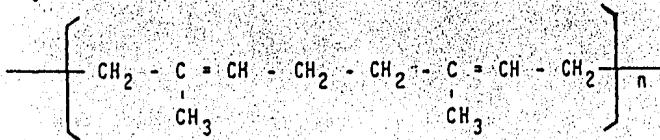


FIGURA NUMERO 19 . DISTRIBUCION DE PESOS MOLECULARES DE POLIISOPRENOS PROCEDENTES DE H. BRASILIENSIS Y E. TIRUCALLI

Mientras el latex del Hevea posee hidrocarburos con un peso molecular de aproximadamente 500 000 hasta 2 000 000, - el procedente del Euphorbia Tirucalli los tiene con un peso de 20 000-50 000, lo que indica que ésta especie es un candidato en investigación para la sustitución del petróleo, - no sólo como energético, sino también como fuente de materia prima para la industria; lo mismo sucede con las otras especies de Euphorbia y Asclepias en estudio.

En análisis por espectroscopía en el infrarrojo de los hidrocarburos extraídos del latex por benceno, muestra que en su mayoría son polímeros lineales del isopreno, esto es:



La naturaleza de los grupos terminales aún no ha sido determinada. Contiene además, aunque en menor cantidad o -- otros hidrocarburos de naturaleza isoprenoide, como terpenos,

diterpenos, triterpenos e isoprenos cíclicos.

Acoplando la cromatografía de gases con espectroscopia de masas, es posible identificar los compuestos extraídos - del latex por acetona, éstos son en su mayoría esteroides - de 30 átomos de carbono: triterpenos oxigenados como eufol- ($C_{30}H_{50}O$), Lanosterol ($C_{30}H_{50}O$), Euphorbol ($C_{31}H_{52}O$).

El aceite producido por las plantas laticíferas es extraído en su mayoría por una mezcla de solventes: Benceno y Acetona. Las especies, actualmente en estudio, contienen entre un 2 y un 10 % del peso total de la planta de hidrocarburos.

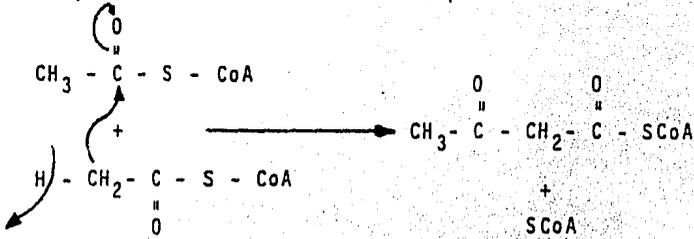
El latex es, en resumen, una emulsión aceite-agua, formada por partículas (gotas líquidas) en forma esferoidal, cuyo tamaño depende de la especie vegetal laticífera analizada, las partículas están constituidas, en su mayoría por polisoprenos y en menor cantidad terpenos, terpenoles y otros compuestos. (1)

BIOSINTESIS DE HIDROCARBUROS EN LAS PLANTAS:

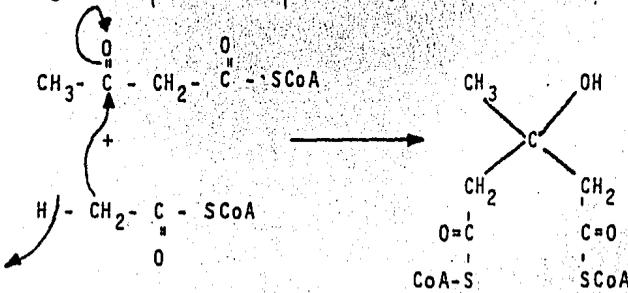
La energía solar captada durante la fase luminosa de la fotosíntesis, se conserva como energía de enlace fosfato del ATP y poder reductor en forma de NADPH. En la fase oscura el ATP y el NADPH se utilizan para llevar a cabo la reducción del CO_2 a glucosa y otros productos; que serán transformados, durante la glucólisis y otros procesos oxidativos, a ácido pirúvico, que por su descarboxilación y reacción con la Coenzima A, dará lugar a la Acetil Coenzima A, que es el precursor común de varios productos biosintéticos, entre ellos los terpenos, esteroides y los polisoprenos como el caucho. Finalmente, todos los átomos de carbono de los hidrocarburos vegetales proceden del CO_2 atmosférico.

- Mecanismo propuesto para la biosíntesis de Compuestos de tipo Isoprenoide:

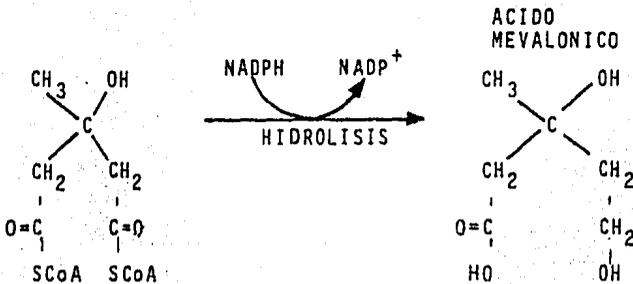
a) El primer paso es la condensación de dos moléculas de Acetil Coenzima A para formar la acetoacetil Coenzima A, en una reacción catalizada por la enzima tiolasa.



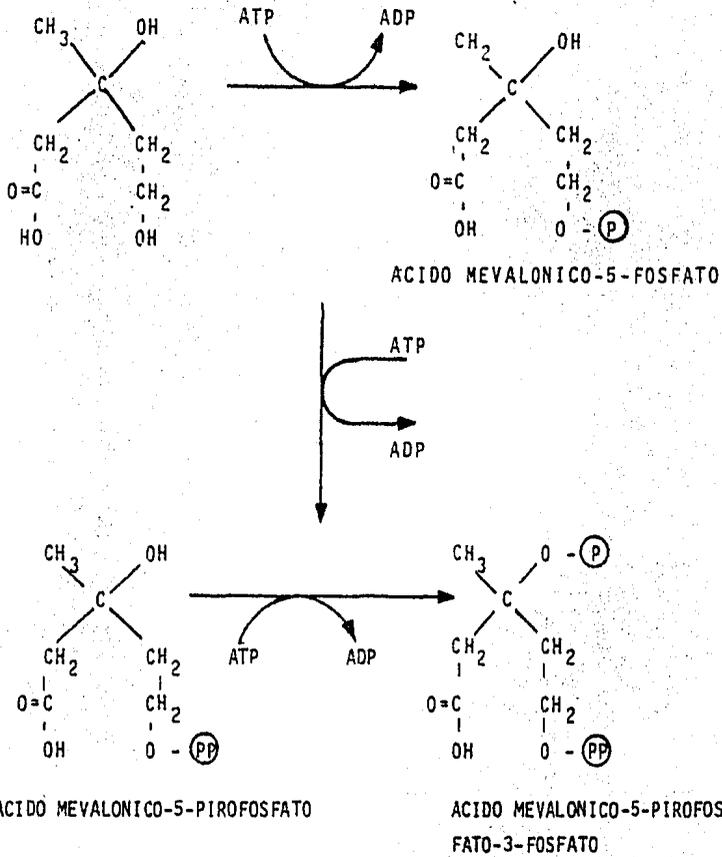
b) La Acetoacetil Coenzima A, recientemente formada se condensa con otra molécula de Acetil Coenzima A para dar lugar al β -hidroxi- β metil glutaril Coenzima A.



c) Síntesis del ácido mevalónico: El β -hidroxi β -metil-glutaril Coenzima A es reducido por el NADPH, en una reacción catalizada por la enzima β -hidroxi- β -metil-glutarilreductasa, presente en el latex. Esta reacción se lleva a cabo acompañada por una hidrólisis.



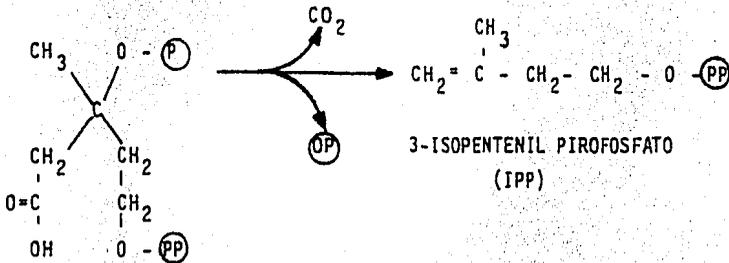
d) Conversión del ácido mevalónico a ácido mevalónico-5-pirofosfato-3-fosfato. El mevalonato es fosforilado -- por ATP pasando por 5-fosfo mevalonato y 5-pirofosfomevalonato.



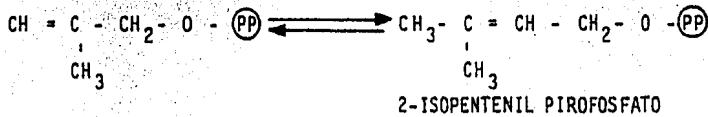
La activación del ácido mevalónico consume tres moléculas de ATP.

e) Descarboxilación: Conversión del ácido mevalónico-5-pirofosfato-3-fosfato a 3-isopentenil pirofosfato, éste es en realidad un isopreno activo. La misma enzima cataliza en forma coordinada la descarboxilación y la eliminación de un grupo hidroxilo fosforilado. Todos los compues--

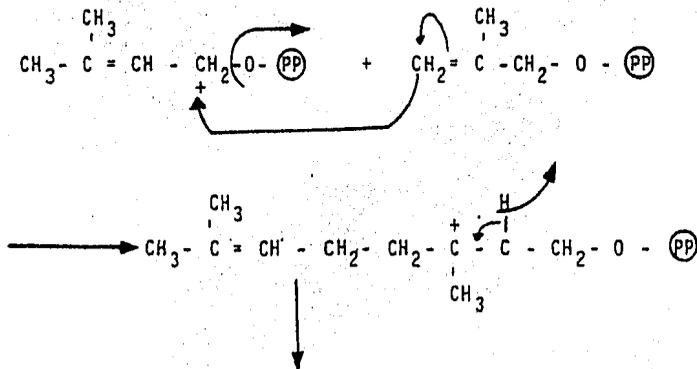
tos naturales que siguen la "regla del isopreno" se sintetizan biológicamente a través del 3-isopentenil pirofosfato.

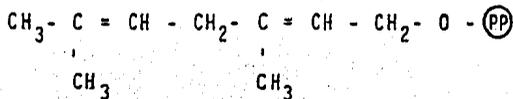


f) reacción de isomerización: este paso puede ser considerado como la iniciación de la síntesis del polisisopreno. El 3-isopentenil pirofosfato se isomeriza a 2-isopentenil pirofosfato. La isomerización consiste en el desplazamiento del doble enlace.



g) Síntesis del Disopreno: Una molécula de 2-isopentenil pirofosfato se condensa con una molécula de 3-isopentenil pirofosfato para dar el primer monoterpreno, el disopreno: geranyl pirofosfato.

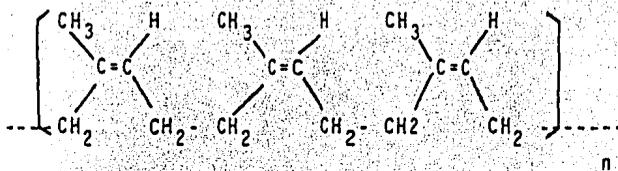




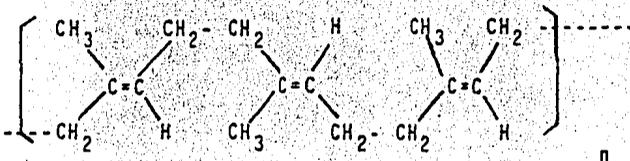
Se propone la formación de iones carbonio que se unirán con una molécula de 3-isopentenil pirofosfato.

h) El Geranil pirofosfato, a su vez, puede producir un ion carbonio y añadir otra molécula de 3-isopentenilpirofosfato. La adición de cada molécula puede llevarse a cabo en dos formas estereoespecíficas:

- Adición Cis:



- Adición Trans:



El tipo de adición cis o trans dependerá de la enzima que contenga la planta y por lo tanto variará de una especie a otra. (1)

Durante este proceso se consume energía de enlace fosfato del ATP y poder reductor en forma de NADPH. En la adición de cada molécula de isopreno activo o 3-isopentenil pirofosfato se consumen tres moléculas de ATP y una de NADPH. El ATP puede ser obtenido, por la planta, a partir de la glucó-

lisis y de la fosforilación oxidativa en mitocondrias, mientras el NADPH se produce mediante la oxidación de la glucosa-6-fosfato a 6-fosfogluconato en el ciclo de las pentosas, esta reacción productora de NADPH está acoplada a la reducción del β -hidroxi- β -metil glutaril Coenzima A. En el latex de estos vegetales se observa, por tanto, gran actividad del ciclo de las pentosas.(1)

POLIMERIZACION DEL ISOPRENO:

Con la adición de cada molécula de 3-isopentenil pirofosfato, la cadena de polisopreno aumenta su tamaño en cinco átomos de carbono, la unión sucesiva de unidades de isopreno da lugar a un polímero cuyo peso molecular está determinado por factores genéticos propios de cada especie; los mecanismos utilizados por la planta para controlar la longitud final de la molécula están aún en discusión.

La reacción de polimerización del isopreno en el seno del latex presenta similitudes con la técnica de polimerización por emulsión (7), ya que ocurre en el interior de las gotas de aceite dispersas en la fase acuosa; para que esta emulsión se mantenga estable, es necesaria la presencia de un agente de superficie o surfactante hidrofílico, cuya naturaleza es desconocida.

La elongación de la cadena no podría llevarse a cabo sin la acción de un catalizador o enzima polimerasa aún no identificada, que probablemente se trate de un complejo de algún metal de transición, la cual debe estar unida a las gotas de aceite; existe la posibilidad de que será la enzima misma la que actúe como agente surfactante.(54)

La acción del catalizador está determinada por el tamaño de la gota de aceite, que crece al aumentar el peso molecular durante el avance de la reacción, decreciendo el radio de curvatura, con lo que se modifica la actividad de la

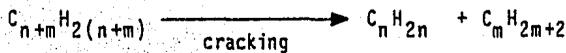
enzima. Cuando la gota de hidrocarburo llega a un determinado tamaño se rompe la unión con la enzima polimerasa o suceden cambios esteéricos que dan por terminada la reacción enzimática mediante la introducción de una enzima pirofosfatasa. (54)

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO:

Actualmente se vislumbran dos opciones prácticas para aprovechar la fuente de energía renovable representada por las plantas productoras de hidrocarburos.

La primera es extraer del latex los hidrocarburos tal y como fueron sintetizados por la planta, mediante solventes orgánicos, como acetona y benceno, separar posteriormente los esteroides que contenga el extracto y someter el resto a procesos de cracking y reforming, para obtener de este modo, compuestos útiles como energéticos.

El proceso de cracking se utiliza actualmente en la refinación del petróleo y consiste en romper los hidrocarburos de alto peso molecular para producir moléculas más pequeñas, de bajo rango de temperatura de ebullición. La reacción de cracking es una ruptura del enlace carbono-carbono para dar hidrocarburos parafínicos u olefínicos de menor peso molecular. (7,9)



El proceso de reforming es un rearrreglo o cambio en la estructura molecular de los hidrocarburos, se emplea dentro de la industria del petróleo para obtener gasolinas con buenas cualidades, antidetonantes.

Esta primera opción es, en la actualidad, viable tecnológicamente y puede ser llevada a cabo inmediatamente. Para implementarla a escala comercial, debe desarrollarse un sis

tema de extracción y separación de los hidrocarburos contenidos en el latex, en que se empleen en forma mínima los -- solventes e incluso se use agua como único solvente. (7)

La segunda opción ofrece posibilidades más remotas y -- requiere de cuidadosas investigaciones para identificar tan to el catalizador o enzima, como el agente de superficie -- que intervienen en la biosíntesis de hidrocarburos, determi nando su peso molecular; ésta consiste en que la planta sin teticese los productos hidrocarbonados con la estructura y pe so molecular deseado, utilizando las posibilidades que en -- un futuro podría ofrecer la ingeniería de las células, modi ficando la enzima o el agente de superficie mediante la ma nipulación genética.

ASPECTOS ECONOMICOS:

En México y en varias regiones del mundo existen zonas áridas no productivas para la agricultura, pero que pueden ser utilizadas para el cultivo de plantas laticíferas, que crecen en forma silvestre en regiones con estas características. Actualmente se están llevando a cabo plantaciones ex perimentales de Euphorbia Lathyrus y Euphorbia Tirucalli en el estado de California, en los Estados Unidos, utilizando -- simientes de las plantas en su condición silvestre, con el fin de adquirir los conocimientos agronómicos básicos como: tipo de fertilizante adecuado, rendimiento por hectárea, -- cantidad de agua requerida, cantidad de energía solar, etc. y poder desarrollar así, su cultivo a escala comercial.

El contenido de hidrocarburos en estos cultivos experi mentales de Euphorbia Lathyrus se ha estimado, en términos de la cantidad de aceite extractable por solventes orgáni -- cos, entre un 8 y un 10 % en peso seco de la planta. Este a ceite está compuesto por una mezcla de polisopreno, esterole s, terpenoles, etc. El valor calorífico de este extracto -- se ha calculado en 39 MJ/kg. (17 000 BTU/lb) (7,8)

En el año de 1978, se realizó la evaluación de los cos

tos de producción de cada barril de aceite obtenido a partir del latex de estos vegetales. El cultivo de un acre tiene un costo de \$100.00 (dls) al año. Utilizando el valor mínimo -- del 8 % de hidrocarburos, se ha obtenido un rendimiento promedio aproximado de 10 barriles de aceite por acre al año. - El costo del proceso de extracción, empleando solventes y mé todos convencionales, es de \$10.00 (dls) por barril; por lo tanto, el precio por barril de extracto es de aproximadamente \$20.00. (7) A este valor es necesario añadir los costos de - los procesos de cracking y reforming.

El rendimiento de producto por acre puede aumentar, aún sin mejoramiento genético, con una selección de las semillas procedentes de aquellas plantas con mayor rapidez de crecimiento, hasta aproximadamente 20 barriles por acre al año. - Conociendo como las plantas laticíferas utilizan en carbono- y los mecanismos de control de las secuencias biosintéticas, es posible, mediante manipulación genética, lograr rendimientos de hasta 30 barriles de aceite por acre al año aproximadamente, alterando los productos de almacen de energía, haciendo que la planta produzca más hidrocarburos que carbohidratos. El aumento de los rendimientos producirá como consecuencia una disminución en los costos de producción. (9)

Los residuos agrícolas resultantes de la explotación de estos cultivos pueden ser aprovechados para la obtención de energéticos, por pirólisis o por fermentación.

En resumen, el aprovechamiento a gran escala de esta -- fuente energética, requiere de un mejoramiento en las técnicas de cultivo, así como, de el uso de nuevas tecnologías de extracción.

CAPITULO IV

FOTOSINTESIS ARTIFICIAL PARA LA PRODUCCION DE ENERGETICOS

La radiación solar que llega a la superficie de la tierra es una fuente energética, renovable, inagotable y de gran magnitud, sin embargo, debido a su carácter disperso e intermitente es necesario almacenarla, para compensar la variación diaria y poder aprovecharla a gran escala.

Los vegetales, mediante la fotosíntesis, captan la energía solar y la almacenan en compuestos químicos, que pueden ser transformados a combustibles líquidos o bien, utilizarse directamente como energéticos por combustión.

Experimentos recientes analizan la posibilidad de manipular y hasta imitar el mecanismo fotosintético, simplificándolo, esto es, utilizando sistemas fotosintéticos reconstruidos, capaces de llevar a cabo un tipo simplificado de fotosíntesis, que se traduzca en la producción específica de determinados compuestos energéticos como metano, amoníaco, peróxido de hidrógeno y el más importante, hidrógeno.

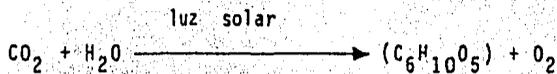
La producción fotosintética de hidrógeno y oxígeno a expensas de agua y energía solar, se conoce como "Biofotólisis del Agua", y que llevada a cabo, empleando como sistema-transductor, interfases fotosintéticamente activas, suplementadas con enzimas y otros componentes, constituye la clave de la "Fotosíntesis Artificial", que auna los esfuerzos de investigación tendientes a reproducir el proceso fotosintético fuera de la célula, con miras a la obtención de energéticos.

FOTOSINTESIS NATURAL:

Para comprender los modelos propuestos para la fotosín

tesis artificial, es necesario, previamente, estudiar el proceso fotosintético, tal y como se lleva a cabo en la célula vegetal.

- Definición: La fotosíntesis es el proceso por el cual -- las plantas sintetizan compuestos orgánicos, a partir de sus sustancias inorgánicas, en presencia de luz solar, esto es, la conversión del bióxido de carbono y del agua a carbohidratos y oxígeno.



Los carbohidratos así formados tienen más energía química potencial que las sustancias de partida, es decir, que el bióxido de carbono y el agua. El suministro de energía solar a compuestos de baja energía, hace que estos se conviertan en compuestos de energía elevada.

- Fases de la Fotosíntesis: La fotosíntesis se lleva a cabo por un mecanismo que puede dividirse en dos fases: una reacción fotoquímica, en presencia de luz, o fase luminosa, y una reacción no fotoquímica, de tipo enzimática, más lenta, que puede realizarse en la oscuridad, o fase oscura.

Durante la fase luminosa, la energía radiante es utilizada para romper en forma oxidativa el agua, y desprender oxígeno, generar poder reductor en forma de NADPH o estado reducido del nicotin amida dinucleotido fosfato, y se almacena en forma química en el enlace fosfato del ATP. Tanto el --- NADPH como el ATP son utilizados para la fase oscura, en que se reduce el bióxido de carbono a carbohidratos. (47)

- Descripción del Aparato Fotosintético: El aparato fotosintético es la parte de la célula foliar que contiene aquellos componentes que absorben la luz y que canalizan la energía de las moléculas de los pigmentos excitados a una serie de reacciones químicas y enzimáticas. En las algas verdes y en las plantas superiores, la clorofila, principal pigmento -

...sintético, se encuentra en un organelo celular llamado cloroplasto. (36,47)

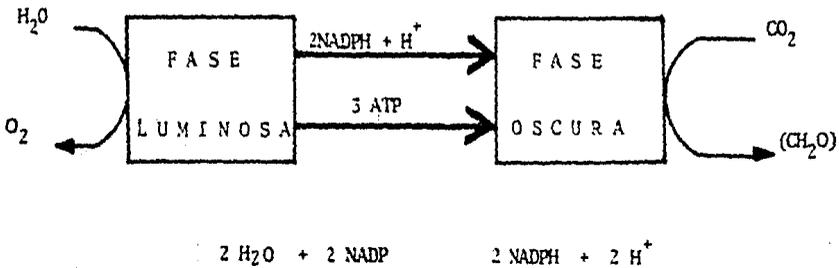


FIGURA NUMERO 20. FASES DE LA FOTOSINTESIS

Internamente el cloroplasto está formado por un sistema de láminas o tilacoides aplanados que están colocados en montones, en ciertas regiones verdes, densas, llamadas granos. - Cada lámina del cloroplasto puede tener dos membranas de doble capa. Los granos están fijos de un modo firme en una matriz incolora llamada estroma y todo el cloroplasto está rodeado por una doble membrana. Dentro del cloroplasto los granos están conectados entre sí por un sistema de membranas no rígidas, llamadas láminas del estroma.

- Absorción de Luz: La luz, es la parte visible del espectro de radiación electromagnética, cuyas longitudes de onda van desde el violeta a 380 nm. hasta el rojo a 750 nm.

El sol irradia a la tierra energía que comprende una amplia gama del espectro electromagnético, pero la atmósfera terrestre sólo es transparente a parte de la radiación infrarroja y ultravioleta, y a toda la luz visible.

La teoría cuántica indica que la radiación se transmite en cantidades discretas de energía, denominadas "cuantos". La energía de un cuanto de luz o fotón depende de la frecuencia de la luz (ν), según la relación:

$$E = h\nu \quad \text{donde} \quad \nu = c / \lambda$$

en que h es la constante de Planck, que es igual a 6.62×10^{-27} ergs/seg. De esta fórmula se deduce que la energía de los fotones es inversamente proporcional a la longitud de onda (λ)

Para que tenga lugar la fotosíntesis, la luz, en forma de cuantos, debe ser capturada por las plantas; las moléculas conocidas como pigmentos, que se encuentran en los cloroplastos, deben absorber la energía de un fotón de longitud de onda determinada y posteriormente utilizar esta energía, para iniciar la cadena de procesos químicos fotosintéticos.

La capacidad de una sustancia para absorber luz depende de su estructura atómica, particularmente de la ordenación de los electrones que rodean al núcleo. Cuando un fotón es absorbido, transfiere toda su energía a uno de los electrones y el átomo o molécula alcanzan un estado excitado rico en energía. El fotón debe tener una energía determinada para poder excitar a un sólo electrón. Las moléculas o átomos excitados son completamente inestables, tienden a volver a su estado fundamental de diferentes maneras: (36)

- Fluorescencia: en que parte de la energía absorbida se emite en forma de calor y se desprende un fotón de menor energía que el absorbido, esto es a longitudes de onda superiores.

- Fosforescencia: Al absorber un cuanto de energía un electrón que está en su estado fundamental apareado con otro-

electrón, formando un singlete (spins apareados), pasa al estado excitado formando también un singlete de alta energía, que al regresar nuevamente al estado fundamental pasa por un estado de menor energía o metaestable, en que los electrones forman un triplete (spins no apareados y de ahí se emite un fotón de luz de menor energía y de mayor longitud de onda.

- **Fotosensibilización:** el fenómeno de fotosensibilización implica la interacción de dos moléculas absorbentes en que una de ellas, denominada donadora, es iluminada con luz de una determinada longitud de onda, que absorbe esta especie, pasando a un estado excitado, que al volver al estado fundamental, emite por fluorescencia una radiación con longitud de onda menor, que a su vez corresponde al espectro de absorción de otra especie denominada aceptora. (36)

- **Pigmentos fotosintéticos:** Todos los organismos fotosintéticos poseen uno o más pigmentos orgánicos capaces de absorber la radiación visible, la cual iniciará las reacciones fotoquímicas. Los tres principales tipos de pigmentos que se encuentran en las plantas y algas son: las clorofilas, los carotenoides y las ficobilinas. Los carotenoides y las ficobilinas son llamados pigmentos fotosintéticos accesorios, ya que los cuantos absorbidos por ellos pueden ser transferidos a la clorofila por fotosensibilización. (43)

- **Clorofila:** Las clorofilas son los pigmentos que dan a la planta su característico color verde. Las plantas superiores contienen dos formas: la clorofila a y la clorofila b, y cada una de ellas juega un papel específico en el mecanismo de la fotosíntesis.

La Clorofila a contiene cuatro anillos pirrólicos que se hallan dispuestos en una estructura macrocíclica, en la que los cuatro átomos de nitrógeno centrales se hallan coordinados con un ión Mg^{+2} para formar un complejo planar, muy estable, que posee además, una cadena lateral terpenoide, larga e hidrofoba, formada por el alcohol, denominado fitol

La estructura de la clorofila b es sólo ligeramente diferente, contiene un grupo carbonilo ($-C=O$) en lugar de un grupo metilo ($-CH_3$) en uno de los anillos.

Las algas pardas, diatómeas y dino flagelados además de la clorofila a poseen clorofila c, mientras que las algas rojas poseen clorofila d. Las células fotosintéticas que no producen oxígeno, no poseen clorofila b.

Todas las clorofilas absorben luz visible con eficacia, gracias a sus muchos enlaces dobles conjugados. Además la energía luminosa de los fotones absorbidos por la clorofila - pueden llegar a deslocalizarse y a difundirse por toda la estructura electrónica característica de esta molécula.

La clorofila es la molécula captadora de luz más importante de la mayor parte de las plantas verdes superiores. -- Los picos de absorción de la clorofila varían de una especie a otra, las diferencias no se deben a la existencia de diferentes formas moleculares, sino que reflejan, aparentemente, la proximidad relativa de las moléculas de clorofila a otras moléculas de pigmentos de las membranas tilacoides o a la formación de complejos pigmento-proteína. (39)

- Carotenoides y Ficobilinas: los carotenoides son pigmentos amarillos o naranjas, que se encuentran en todas las células fotosintéticas, contienen un sistema de dobles enlaces conjugados de tipo polieno. Son hidrocarburos simples o que contienen oxígeno, de cadenas de 40 átomos de carbono formados a partir de unidades de isopreno. Poseen un espectro de absorción de triple banda en la región de los 400 a 500 nm. Los carotenoides están situados en las láminas del cloroplasto, muy próximos a las clorofilas. La energía absorbida por los carotenoides puede ser transferida a la clorofila a mediante fotosensibilización, y ser utilizada para la fotosíntesis. Además, los carotenoides pueden proteger a las moléculas de clorofila de una excesiva fotooxidación por exceso de luz. Entre los carotenos encontrados en las células fotosintéticas se encuentran el caroteno, la espiriloxantina y la luteína.

Las algas marinas rojas y la cianofíceas contienen un grupo de pigmentos conocidos como ficobilinas. Son tetrapirroles lineales y están relacionados estructuralmente con las porfirinas de la clorofila, pero no poseen la cadena lateral del fitol, ni tampoco, contienen Magnesio. Hay tres clases de ficobilinas: ficoeritrinas, ficocianinas y aloficocianinas. (36)

La energía absorbida por las ficobilinas (pigmentos accesorios) es transferida a las clorofilas por medio del proceso de fotosensibilización.

Las plantas superiores y las algas, en el transcurso de la evolución, han sintetizado distintos pigmentos para captar, lo más eficientemente la radiación solar que les llega; la función de los pigmentos accesorios es, en resumen, absorber la energía luminosa a longitudes de onda a las que las clorofilas no son eficientes, y así complementar a las clorofilas como "trampas" de luz. Sin embargo, la energía luminosa absorbida por los pigmentos debe, en primer lugar ser transferida a la clorofila, antes de que pueda ser utilizada para realizar trabajo fotoquímico.

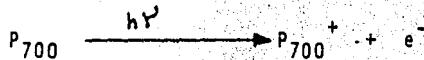
- Fotosistemas: Los pigmentos fotosintéticos en los cloroplastos de las plantas están organizados en dos conjuntos o agrupaciones funcionales que, a su vez, se hallan conectados por cadenas de transporte electrónico. Estas unidades funcionales, se denominan Fotosistema I y Fotosistema II.

Todas las células que desprenden oxígeno contienen ambos fotosistemas, mientras que las bacterias fotosintéticas, que no desprenden oxígeno, contienen solamente el fotosistema I. Cada fotosistema posee su propia agrupación característica de pigmentos absorbentes de luz, a la que se le llama unidad fotosintética. (43)

- Unidad Fotosintética: Una unidad fotosintética está formada por un grupo de pigmentos y otras moléculas que actúan en forma concertada, utilizando la energía de excitación y -

su transferencia por fotosensibilización, como un mecanismo por el cual el centro de reacción comunica con una antena de pigmentos que captan la luz. Un solo cuanto de energía absorbido en cualquier lugar de un grupo aproximadamente de 250 moléculas de pigmento, migra a un centro de reacción que contiene una molécula especial de clorofila, con la mayor longitud de onda de absorción de todo el grupo y provoca una separación de cargas.

Mediante técnicas espectroscópicas se ha determinado que el centro de reacción de la unidad fotosintética del fotosistema I, es un tipo especial de clorofila a, al que se le designa como P_{700} , que se presenta en cantidades muy pequeñas, con un máximo de absorción a una longitud de onda de 700 nm. Se decolora reversiblemente a la luz, esta decoloración corresponde a una oxidación de:



Se ha demostrado que el P_{700} es el pigmento trampa del centro de reacción en el que se capta, en forma irreversible la energía luminosa y se utiliza en las reacciones fotoquímicas, esto es, el P_{700} es el donador electrónico primario del Fotosistema I. El electrón producido en este fotoacto es transferido a un aceptor primario y transportado a través de una cadena de acarreadores electrónicos. La naturaleza de este centro de reacción es aún desconocida, se cree que es un dímero de moléculas de clorofila a, formado gracias a la intervención de ligandos bifuncionales, posiblemente de naturaleza proteica. (39)

El Fotosistema II tiene un contenido más elevado de clorofila b que el fotosistema I y es muy fluorescente. El centro de reacción de la unidad fotosintética del Fotosistema II se denomina P_{680} y es también un tipo especial de clorofila a, cuya naturaleza es aún desconocida, y presenta un máximo de absorción a 682 nm.

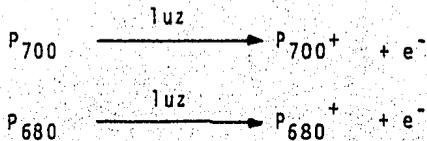
- Fotooxidación y Fotorreducción: El resultado final de la fase luminosa de la fotosíntesis es el rompimiento oxidativo del agua, para desprender oxígeno y generar poder reductor en forma de NADPH, además de almacenar energía en forma de ATP.

La absorción de energía luminosa provoca que los electrones fluyan desde un donador electrónico a un aceptor en una dirección que es opuesta a la que predicen los potenciales de oxidación-reducción estándar de los sistemas que interactúan. Por iluminación, en las células fotosintéticas se lleva a cabo un flujo de electrones desde el agua hasta el NADP^+ en contra del gradiente de potencial.

La transferencia de electrones a través de la cadena de transporte requiere que cada uno de los acarreadores sea reducido y oxidado, para que la energía del electrón pueda pasar a lo largo de la cadena hasta el NADP.

Cuando el electrón es transportado a favor de un gradiente de potenciales de oxidación-reducción, durante el flujo, se libera energía, la cual será almacenada en forma de energía de enlace fosfato en el ATP.

- Fotosistemas I y II: Una vez que la energía luminosa ha sido captada por la unidad fotosintética de cualquiera de los dos fotosistemas, es transferida al centro de reacción donde se lleva a cabo la separación de cargas:



El electrón producido en este proceso es transferido a una molécula aceptora, denominada aceptor primario. Una vez que esto sucede, existe una gran probabilidad, en experimentos de laboratorio, de que el electrón retorne al donador original, sin embargo, en el sistema natural, esta probabilidad es muy pequeña, debido a una disposición geométrica espe

cial, así como a los potenciales de oxidación-reducción que favorecen el paso del electrón del aceptor a la cadena de -- transferencia electrónica. (47)

El transporte de electrones se lleva a cabo a través de dos sistemas, transporte electrónico no cíclico y transporte electrónico cíclico.

- Transporte no cíclico de electrones: involucra a los dos fotosistemas, y para su estudio puede dividirse en transporte desde el Fotosistema I hasta el NADP y en transporte desde el Fotosistema II hasta el Fotosistema I.

- Transporte desde el Fotosistema I hasta el NADP: El P₇₀₀ transfiere su electrón al aceptor primario, cuya naturaleza es aún desconocida y al que se le identifica como Z, el cual queda reducido oxidándose al transferir un electrón a un --- transportador o transportadores electrónicos que lo transfieren hasta el NADP.

Se ha identificado una proteína denominada ferredoxina, la cual, en su estado reducido transfiere electrones al NADP con la ayuda de la enzima ferredoxin-NADP-reductasa, la cual es una flavoproteína. En el transporte electrónico no cíclico quedan interconectados ambos Fotosistemas.

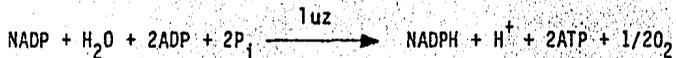
- Flujo de electrones desde el Fotosistema II hasta el Fotosistema I: cuando el centro de reacción del Fotosistema II absorbe un fotón, se oxida perdiendo un electrón, el cual es transferido al aceptor primario del fotosistema II, aún no identificado, pero que se ha designado como Q, y pasando a una cadena de transportadores de electrones que conduce hasta el Fotosistema I, para restituirle su electrón. Entre los accreadores que se han identificado se encuentra la Plastoquinona, citrocromos f y b(559), y la plastocianina.

Durante la transferencia electrónica a favor del gra -- diente de potencial entre la plastoquinona y el citrocromo f

se lleva a cabo la formación de dos moléculas de ATP a expen-
sas de dos moléculas de ADP y fosfato inorgánico, mediante
el mecanismo de fotofosforilación.

El restablecimiento del centro activo del Fotosistema II
a su estado normal, es el resultado de transferencia electró-
nica a favor del gradiente de potencial, desde el agua hasta
el Fotosistema II, con el desprendimiento de oxígeno.

La reacción global del flujo de electrones no cíclico -
es la siguiente:



- Flujo de electrones cíclico: En este proceso, que tam-
bién requiere de luz, sólo participa el Fotosistema I. Un fo-
tón produce la oxidación del centro de reacción P₇₀₀, y el e-
lectrón es transferido al aceptor primario del fotosistema I
o Z y de ahí puede ser transferido o no a la ferredoxina. En
vez de ser acarreado hasta el NADP, el electrón es cedido a
otro transportador electrónico: citocromo b₆ que retorna al
centro de reacción P₇₀₀, restituyéndolo de nuevo a su estado
reducido. Durante el flujo de electrones, recorren un camino
a favor del gradiente de potencial, por lo que se lleva a ca-
bo la fotofosforilación de una molécula de ADP para producir
una de ATP. La reacción global del flujo cíclico es:



- Fase Oscura, Formación de Glucosa: La formación de gluco-
sa en la fase oscura de la fotosíntesis empieza con la fija-
ción de bióxido de carbono y utiliza las moléculas de ATP y
NADPH producidas en la fase luminosa para sintetizar carbohi-
dratos, mediante la siguiente reacción:



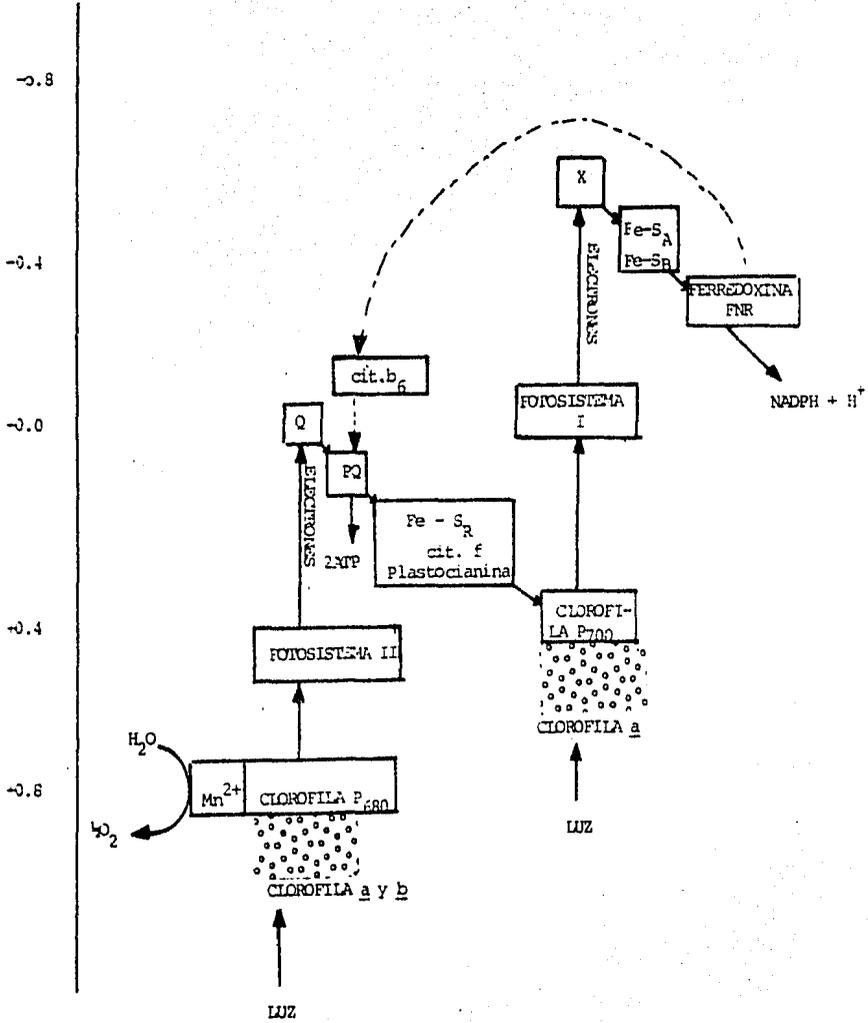


FIGURA NUMERO 21. ESQUEMA Z, TRANSPORTE ELECTRONICO EN CLOROPLASTOS

La captación cuántica de la energía luminosa junto con las reacciones de transporte electrónico ocurren en las lamí- nas o tilacoides, que sostienen las unidades fotosintéticas de los dos fotosistemas; y la fase oscura, en que se realiza la fijación del bióxido de carbono y su reducción a carbohidratos tiene lugar en el estroma, que contiene numerosas pro- teínas solubles incluyendo las enzimas del ciclo de Calvin.

La absorción de un fotón de luz por la clorofila da lugar a una separación de cargas positivas y negativas en la - región de la membrana del tilacoide denominada centro de -- reacción; la habilidad para mantener estas cargas separadas, evitando su recombinación, con la consiguiente pérdida de e- nergía por calor o fluorescencia, es una de las principales - características de las membranas del tilacoide. El electrón- desprendido sigue un camino lineal desde el agua hasta el - NADP, el movimiento es unidireccional desde el interior del- tilacoide hacia el exterior, por lo tanto, la parte interior queda cargada positivamente y el exterior negativamente. Lo- que crea una diferencia de potencial eléctrico a través de - la membrana.

La membrana del tilacoide debe ser asimétrica tanto bio- químicamente como estructuralmente, para mantener el gradien- te de protones y las diferencias de carga a uno y otro lado- de la membrana. (55)

BIOFOTOLISIS DEL AGUA:

La oxidación de agua a oxígeno molecular requiere de la transferencia de cuatro electrones, lo cual es difícil de -- llevar a cabo en una reacción fotoquímica de oxidación, en -



que las transferencias de electrones tienen lugar en un solo paso o fotoacto, por lo tanto, es necesaria la presencia de- un catalizador que reciba los cuatro electrones procedentes- del agua.

La reacción de escisión del agua es llevada a cabo en la superficie interna de las membranas de los tilacoides, sobre el lado oxidante del Fotosistema II. La fotooxidación del centro de reacción P_{680} genera un ión P_{680}^+ , muy oxidante que -- promueve la oxidación de un donador asociado al fotosistema II que a su vez, recibe electrones producidos a partir del rompimiento oxidativo del agua. La transferencia se realiza mediante la intervención de un complejo de Manganeso-Proteína, designado como S, que puede acumular cuatro cargas positivas, - esto es, puede actuar en cinco estados de oxidación diferentes, S_0 , $S(I)$, $S(II)$, $S(III)$, $S(IV)$, distintos cada uno del anterior, por haber perdido un electrón. Al transferirse un electrón del centro de reacción P_{680} hasta el aceptor primario Q, provoca el paso de un electrón desde S hasta el P_{680} . Cuando el sistema S ha perdido cuatro electrones y se encuentra en su mayor estado de oxidación, oxida a dos moléculas de agua, produciendo el desprendimiento de una molécula de oxígeno (O_2), volviendo el sistema S a su estado reducido.

Junto a la molécula de catalizador de Manganeso se presume la existencia de un compuesto de Cloruro (Cl^-) que juega un papel similar en las cercanías del fotosistema II. Se ha propuesto el siguiente modelo para el flujo de electrones desde el agua hasta el fotosistema II.

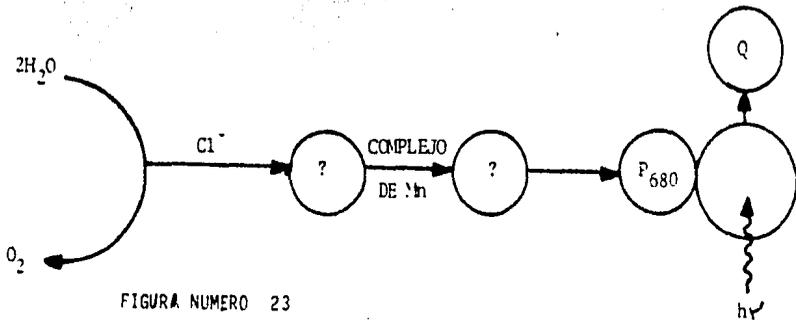


FIGURA NUMERO 23

La naturaleza del complejo de Manganeso es aún desconocida, muchos complejos de Mn(IV) en sistemas no naturales adoptan configuraciones binucleares, en que dos átomos de Mn se unen por dos átomos de oxígeno que forman un puente entre ellos. Por medio de estudios de espectroscopía de fluorescencia de rayos X en sistemas naturales, se ha podido determinar la existencia de dos átomos de Mn, con una pequeña distancia entre ellos, que pueden corresponder a complejos binucleares o a dos moléculas que se encuentran actuando en pares en forma coordinada para llevar a cabo la misma transferencia electrónica. (39)

FOTOSINTESIS ARTIFICIAL:

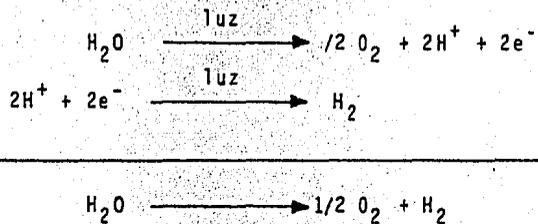
Los sistemas de fotosíntesis artificial tienen como objetivo reproducir las características del proceso fotosintético, para llevar a cabo, fuera de la célula viva, la función principal del cloroplasto, esto es, capturar en forma cuántica la energía solar y almacenarla en compuestos químicos estables, como por ejemplo, el Hidrógeno. (6)

La fotosíntesis, es a menudo considerada como un proceso ineficiente, debido a la pequeña cantidad de biomasa producida, en comparación con la magnitud de la energía solar incidente, sin embargo, si consideramos la eficacia en que un fotón es convertido en un electrón y en un catión, esto es, la capacidad reductora y oxidante, se llega a la conclusión, de que es un proceso realmente eficiente. (39)

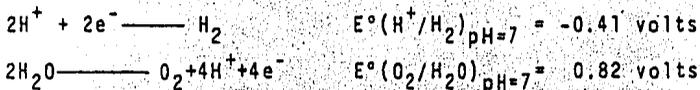
Los sistemas fotosintéticos artificiales tienen grandes ventajas sobre los sistemas naturales, ya que no están sujetos a las restricciones impuestas para ser compatibles con la vida; pueden ser diseñados para operar a altas temperaturas, aprovechando el calor generado por la radiación solar, incrementando la eficiencia, en lugar de disiparlo como vapor de agua; no existen requerimientos energéticos para otras funciones como fotorrespiración, crecimiento, reproduc-

ción, etc.; una instalación de fotosíntesis artificial es inmune a los virus, hongos y a plagas de insectos depredadores; y puede utilizar tierra que actualmente es inútil para el cultivo agrícola, por ejemplo, los desiertos.

En los vegetales, durante la fotosíntesis, los electrones extraídos del agua, se utilizan para reducir el bióxido de carbono a compuestos químicos que constituyen la biomasa, como madera, fibras celulósicas, materiales amiláceos, etc.- En la fotosíntesis artificial, los electrones se utilizan para reducir dos protones obtenidos a partir de la molécula de agua, y producir hidrógeno. La reacción es la siguiente:



donde los potenciales de oxidación-reducción de las dos medias celdas son:



la energía libre asociada con la transferencia de cada electrón en la reacción global es de $G=1.23 \text{ eV}$. (46) o de $1.97 \times 10^{-12} \text{ ergs}$. Un fotón de energía luminosa con una longitud de onda de 1000 nm , posee una energía suficiente para provocar la transferencia de un electrón.

$$= 1000 \text{ nm} = 1 \times 10^{-4} \text{ cms.}$$

La energía de un cuanto de luz a esa longitud de onda es:

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$$E = \frac{(6.62 \times 10^{-27} \text{ erg/seg.}) (2.99 \times 10^{10} \text{ cms/seg})}{1 \times 10^{-4} \text{ cms.}}$$

$$E = 1.979 \times 10^{-12} \text{ erg/cuanto}$$

Considerando una eficiencia del 100 %, se puede decir que una radiación electromagnética con longitud de onda menor o igual a 1000 nm, ($\lambda \leq 1000 \text{ nm}$) provocará la transferencia de un electrón desde una molécula de agua hasta el hidrógeno.

Sin embargo, cuando se toma en cuenta el factor eficiencia, este límite puede descender a longitudes de onda menores; por experimentación se ha encontrado que es de aproximadamente 611 nm. (46)

$$\lambda = 611 \text{ nm} = 6.11 \times 10^{-5} \text{ cms.}$$

$$E = \frac{(6.62 \times 10^{-27} \text{ erg/seg}) (2.99 \times 10^{10} \text{ cm/seg})}{6.11 \times 10^{-5} \text{ cms.}}$$

$$E = 3.2 \times 10^{-12} \text{ erg/cuanto.}$$

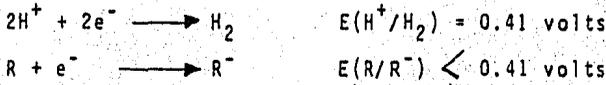
Por lo tanto, radiación con una longitud de onda igual o menor a este límite, será capaz de inducir la transferencia electrónica, y por lo tanto llevará a cabo la escisión de la molécula de agua. La energía del fotón en exceso, será transformada en calor, bajando la eficiencia de conversión energética del proceso.

GENERACION FOTOINDUCIDA DE HIDROGENO A PARTIR DE AGUA:

La conversión de la energía solar a compuestos químicos combustibles mediante un proceso de oxidación-reducción fotoquímica requiere de reacciones de transferencia electrónica-entre especies absorbentes en el espectro visible y otras -- sustancias que puedan ser fácilmente oxidables y reducibles.

La fotogeneración de hidrógeno, como un medio de almacenamiento de energía solar, requiere de la producción, por la luz, de una especie reductora R^- cuyo potencial de reducción

sea menor a 0.41 volts, esto es: (46)



para que se lleva a cabo una transferencia electrónica, espontánea, entre el R^- y el H^+ y producir un átomo de hidrógeno.

Es necesaria la presencia de un catalizador (Catalizador de Reducción Cred.), que facilite la transferencia de dos electrones a dos protones (2H^+) y se desprenda una molécula de hidrógeno gaseoso. (H_2)

La especie reductora R^- se forma mediante la transferencia de un electrón desde el estado excitado de una molécula-fotosensible (FS^*), cuyo potencial de reducción, del estado excitado, debe ser menor que el del reductor, esto es:

$$E(\text{FS}^+/\text{FS}^*) < E(\text{R}/\text{R}^-) < E(2\text{H}^+/\text{H}_2)$$

Una vez que ha sido transferido un electrón desde el estado excitado de la molécula fotosensible hasta el reductor, lo más probable es que haya un proceso de recombinación y se pierda la energía en forma de calor, sin poder ser almacenada.

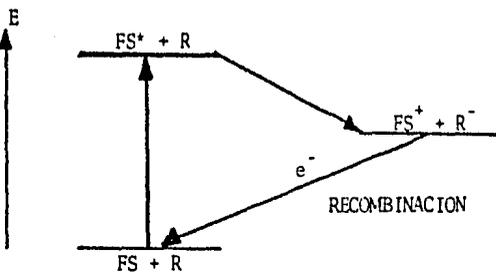
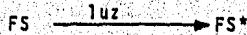


FIGURA NUMERO 24

Para evitarlo, se usa un donador electrónico (D), que permite la conversión rápida del estado oxidado de la molécula fotosensible (FS^+) a su estado normal, quedando oxidado el donador (D^+), el cual se descompone en forma rápida e irreversible, impidiendo la recombinación.

El mecanismo completo de la fotogeneración de hidrógeno es el siguiente:

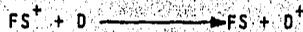
- Absorción de luz por el elemento fotosensible:



- Transferencia electrónica:



- Reducción de la molécula fotosensible:



- Descomposición irreversible del donador:



- Producción de hidrógeno por escisión del agua en presencia de un catalizador de reducción (C red.)



En este proceso FS y R siguen una ruta cíclica, interviniendo en forma similar a un catalizador, mientras se consume, por cada transferencia electrónica, una molécula del donador electrónico y un protón H^+ .

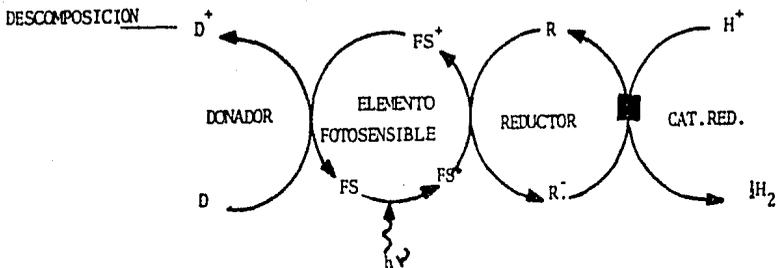


FIGURA NUMERO 25. ESQUEMA GENERAL PARA LA FOTOGENERACION DE HIDROGENO

Los componentes FS, R y D deben cubrir ciertos requisitos, como un potencial de reducción adecuado, cinética de -- reacción óptima. etc.

Se han propuesto diversos compuestos como componentes - para el sistema fotoquímico de generación de hidrógeno. Como molécula fotosensible se ha puesto gran atención en el com-- plejo Tris-2,2 bipyridin Rutenio (II) o $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$, debido a la capacidad para transferir electrones desde su estado exci-- tado, a que posee un potencial redox adecuado y absorbe pode-- rosamente la energía luminosa. La estructura de este complejo es la siguiente:

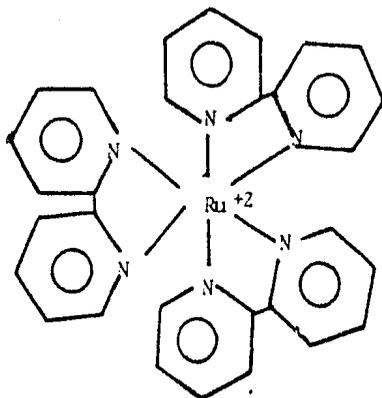


FIGURA NUMERO 26. ESTRUCTURA DEL COMPLEJO TRIS-2,2-BIPYRIDIN RUTENIO (II)

El potencial de reducción del par:

$$E(\text{Ru}(\text{bipy})_3^{3+}/\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}) = -0.83 \text{ volts}$$

que es mucho más negativo que el del hidrógeno ($2\text{H}^+/\text{H}_2$) de -0.41 volts. Otros compuestos utilizados como elementos foto sensibles son las metaloporfirinas. (46)

Como compuesto reductor se utiliza el catión Metil Violo-

geno (MV^{2+}) que por reducción se convierte en el catión monovalente (MV^+):

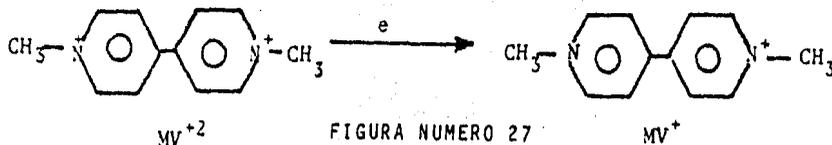


FIGURA NUMERO 27

El potencial de reducción del par:

$$E(MV^{2+}/MV^+) = 0.44 \text{ volts}$$

el cual es suficientemente negativo para reducir un protón - en presencia de un catalizador.

La fotooxidación y descomposición de algunas aminas terciarias como el EDTA y la trietanol amina, las convierte en candidatos excelentes para ser utilizados como donadores.

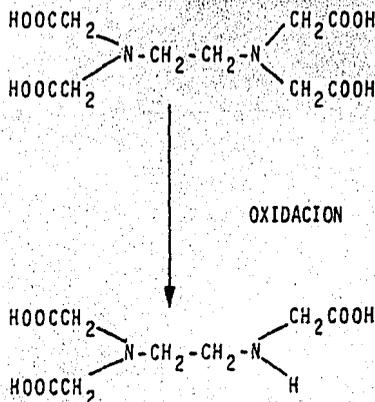


FIGURA NUMERO 28

Como catalizador se ha comprobado la eficiencia de la catálisis heterógena con Platino coloidal, aunque se ha tenido éxito con soluciones coloidales de Oro y Plata.

El estudio sobre el desprendimiento fotoinducido de hidrógeno se ha llevado a cabo utilizando, por lo tanto, el siguiente sistema de componentes fotoquímicos: (46)

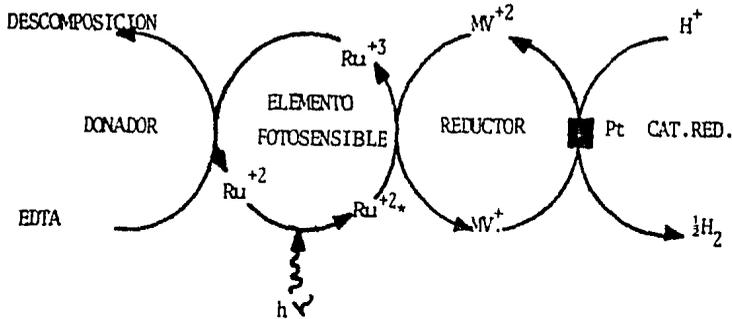
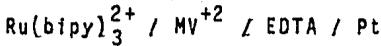
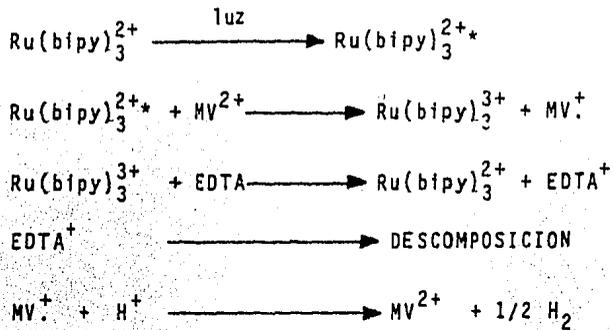
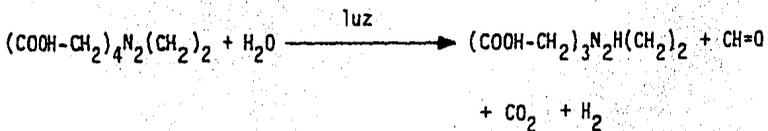


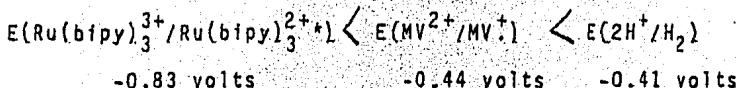
FIGURA NUMERO 29. ESQUEMA DEL SISTEMA FOTOQUIMICO PARA GENERAR HIDROGENO



La reacción final es:

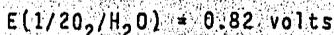


Los potenciales de oxidación-reducción de este fotosistema son adecuados para llevar a cabo la reducción del agua, ya que cumplen con la condición:



DESPRENDIMIENTO FOTOINDUCIDO DE OXIGENO:

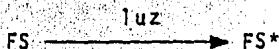
La generación de oxígeno a partir del agua requiere la producción fotoinducida de una especie oxidada, cuyo potencial de reducción sea mayor al del par:



así como, la presencia de un catalizador, que facilite, al igual que en la fotosíntesis natural, la extracción de cuatro electrones, para llevar a cabo la oxidación del agua. El acoplamiento oxidativo del elemento fotosensible (FS), con una molécula aceptora, que sufra inmediatamente algún cambio irreversible, es indispensable para evitar reacciones de recombinación.

El mecanismo general de la generación de oxígeno es el siguiente:

- Absorción de energía luminosa por el elemento fotosensible.



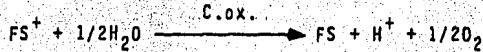
- Acoplamiento oxidativo entre el elemento fotosensible y un aceptor electrónico.



- Descomposición irreversible del Aceptor reducido.



- Reacción entre el elemento fotosensible oxidado y el agua, en presencia de un catalizador de oxidación



Los potenciales de reducción de las especies integrantes de este fotosistema deben cumplir con el siguiente requisito: (46)

$$E(1/2O_2 / H_2O) < E(FS^+/FS)$$

$$E(FS^+/FS^*) < E(A/A^-)$$

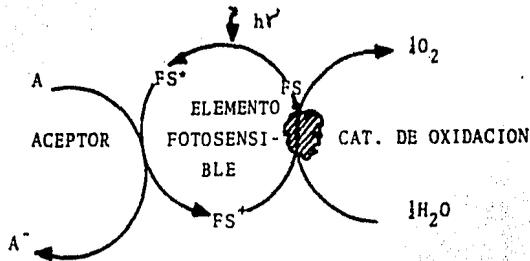


FIGURA NUMERO 30. ESQUEMA GENERAL PARA LA FOTOGENERACION DE OXIGENO

Como molécula fotosensible se ha utilizado comunmente el $Ru(bipy)_3^{2+}$ y otros complejos del tipo ML_3^{2+} , en que $M=Ru$, Fierro, Osmio, entre otros, y $L=$ bipyridina, fenantrolina.

Como compuesto aceptor A se utilizan complejos de Cobalto (III) como por ejemplo el $(Co(NH_3)_5Cl)^{2+}$.

El catalizador de oxidación aún está en estudio, sin embargo, se ha observado eficiencia en la generación de oxígeno cuando se utilizan compuestos a base de óxidos de Rutenio, designados como RuO_x , también se han realizado estudios utilizando PtO_2 y con IrO_2 , actualmente, se encuentra en investigación el empleo de complejos de Manganese, similares a los encontrados en los sistemas fotosintéticos naturales.

El sistema de fotocomponentes se organiza de acuerdo con el siguiente mecanismo:

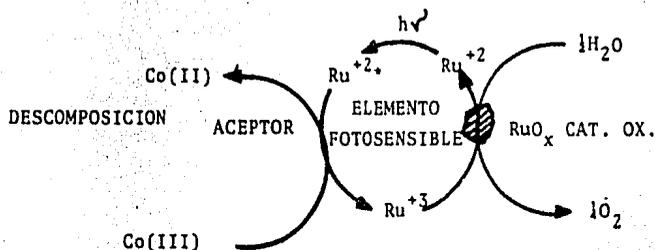
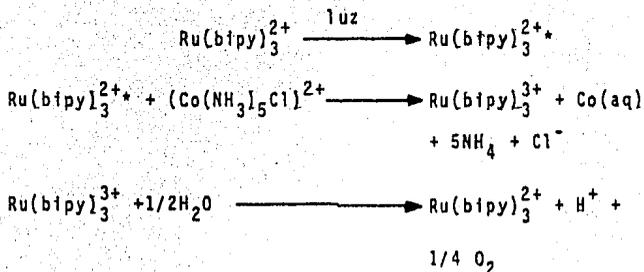


FIGURA NUMERO 31 SISTEMA DE FOTOCOMPONENTES PARA LA GENERACION DE O₂

Los potenciales de reducción del sistema fotoquímico -- cumplen con las condiciones antes establecidas. (46)

$$\begin{aligned} E(\text{Ru}(\text{bipy})_3^{3+}/\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}) &> E(1/2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) \\ 1.27 \text{ volts} &\quad 0.82 \text{ volts} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E((\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl})^{2+}/(\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl})^{+}) &> E(\text{Ru}(\text{bipy})_3^{3+}/\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+*}) \\ 0.52 \text{ volts} &\quad -0.83 \text{ volts} \end{aligned}$$

FOTOGENERACION SIMULTANEA DE OXIGENO E HIDROGENO:

Se han descrito los sistemas para producir hidrógeno y oxígeno en forma separada, con el consumo de agua y de un donador y un aceptor electrónico, respectivamente, cuyo papel es compe

tir con las reacciones de recombinación. El hidrógeno y el oxígeno representan los productos de reducción y oxidación del agua por la luz. Se han realizado estudios para encontrar las condiciones termodinámicas más adecuadas, así como, los catalizadores apropiados para acoplar ambos sistemas en un fotosistema completo de óxido-reducción, en que, todos los componentes, excepto el agua, sigan un camino cíclico.

Existen dos proyectos distintos para llegar a este fin, - el primero consiste en utilizar el mismo elemento fotosensible, conjuntando las dos medias celdas, de oxidación y reducción, en un sistema de un solo fotoacto.

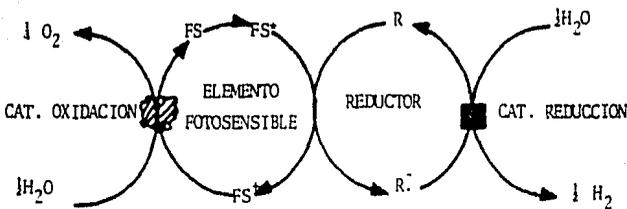


FIGURA NUMERO 32

El segundo consiste en acoplar las dos medias celdas, - de oxidación y reducción, por medio de un transportador electrónico, utilizando dos elementos fotosensibles y generar oxígeno e hidrógeno en un proceso bifotónico, esto es, en dos fotoactos. En este proceso todos los componentes actúan en forma similar a un catalizador.

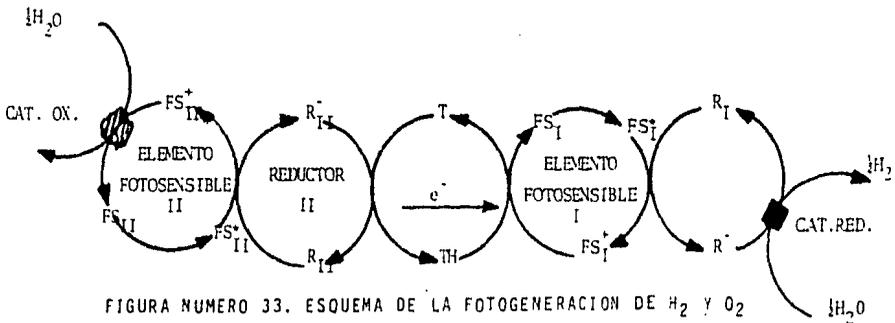


FIGURA NUMERO 33. ESQUEMA DE LA FOTOGENERACION DE H₂ Y O₂

Para lograr el objetivo de generar hidrógeno y oxígeno por fotólisis de agua, es necesario encontrar las condiciones adecuadas para minimizar o evitar totalmente la recombinación de cargas, que se produce en ambos proyectos de acoplamiento, con la consiguiente pérdida de energía en forma de calor.

La inhibición de esta reacción de recombinación, así como, el acoplamiento entre las dos medias celdas fotoquímicas, ha sido logrado mediante el uso de varios sistemas coloidales como micelas, microemulsiones, y vesículas (liposomas). Además se están realizando estudios utilizando sistemas multifásicos como monocapas lipídicas y polielectrolitos. (33)

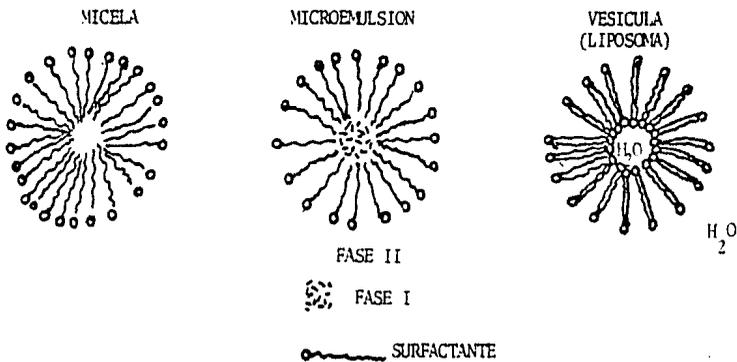


FIGURA NUMERO 34 SISTEMAS DE INTERFASES UTILIZADOS EN LA ESTABILIZACION DE INTERMEDIARIOS

ESTABILIZACION DE LOS INTERMEDIARIOS DE OXIDO-REDUCCION POR SISTEMAS MICELARES:

Las micelas son arreglos de moléculas surfactantes que se forman espontáneamente en solución acuosa, cuando se ha rebasado cierta concentración crítica (Concentración Micelar

Crítica). Son estructuras aproximadamente esféricas, cuyo radio puede estar entre 15 y 30 Å, con los grupos polares o -- orientados hacia afuera, en contacto con la solución acuosa, mientras las cadenas de hidrocarburos se agrupan en el interior de la micela; lo más importante, para nuestro estudio, es que un sistema micelar posee características microheterogéneas. (33)

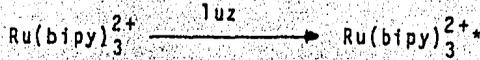
El interior de la micela presenta un carácter apolar, debido a la presencia de las cadenas de hidrocarburos, lo -- facilita la solubilización en su interior de especies hidrófóbicas. Otra característica importante de estos sistemas es la doble capa eléctrica que se forma alrededor de la micela iónica, ya que esta interfase lípido-agua cargada impone una barrera microscópica que previene las reacciones de recombinación entre las especies cargadas en los procesos fotoquímicos.

- Mecanismo de Acción: En un conjunto de componentes fotoquímicos, en que el elemento fotosensible es el $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$, el compuesto reductor es el Metilviologeno (MV^+), se ha estudiado el desprendimiento de hidrógeno en un sistema micelar. Como catalizador se emplea Platino finamente dividido, en -- que cada partícula actúa como un microelectrodo, donde se -- lleva a cabo la reducción. La velocidad de desprendimiento de hidrógeno, ha demostrado ser inversamente proporcional al radio de la partícula de Platino.

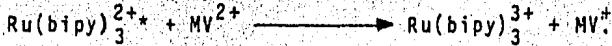
El catalizador se encuentra en forma de dispersión coloidal, en que cada partícula se encuentra protegida por un compuesto hidrofóbico o surfactante, por ejemplo, se suele utilizar Carbowax-20, alcohol polivinílico, un copolímero de anhídrido maleico y estireno, o un jabón catiónico polifuncional. Cada partícula queda rodeada así, por una micela. El tamaño -- óptimo de partícula del catalizador micelar de Platino es de 30 Å de diámetro.

El mecanismo de acción de este sistema consiste en que -- el elemento fotosensible $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$, el cual se encuentra en-

el seno de la solución acuosa, absorbe un fotón de energía luminosa:



y se acopla a una molécula de metil viologeno, que también se encuentra en el seno de la solución acuosa:



la reducción del metilviologeno modifica su comportamiento en la solución coloidal, ya que el MV^{2+} es hidrofílico, mientras que el $\text{MV}^{\cdot+}$ es ligeramente hidrofóbico.

Se ha comprobado que se obtiene mayor eficiencia en el desprendimiento de hidrógeno, cuando uno de los grupos metilo del metilviologeno, se sustituye por una cadena de catorce átomos de carbono ($\text{C}_{14}\text{MV}^{2+}$), debido a que el estado reducido de este compuesto es marcadamente hidrofóbico.

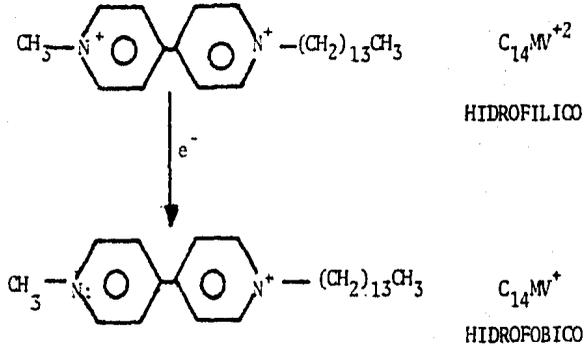


FIGURA NUMERO 35

El metil viologeno o el $\text{C}_{14}\text{MV}^{\cdot+}$ al ser hidrofóbico se pone en contacto con la micela protectora del catalizador de Platino, donde se lleva a cabo la reducción del hidrógeno del agua. El $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{3+}$ se mantiene en la solución acuosa siendo repelido por la micela, quedando así, eficazmente separado del reductor, evitándose de esta manera, las reacciones de recombinación. (33)

El catalizador de Platino lleva a cabo la transferencia de dos electrones desde las moléculas del reductor, hasta el hidrógeno.

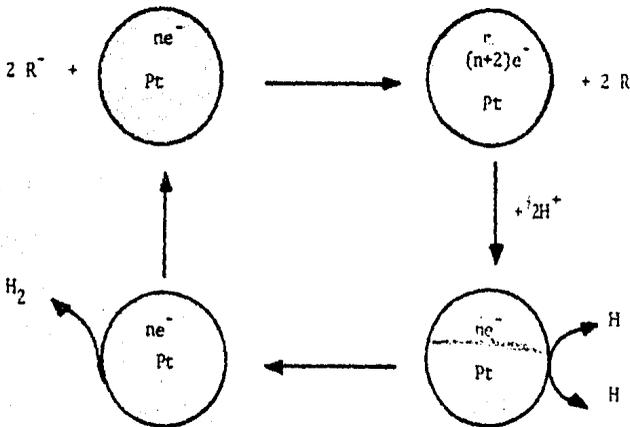


FIGURA NUMERO36 MECANISMO DE ACCION DEL CATALIZADOR DE Pt EN LA FOTOGENERACION DE HIDROGENO.

El elemento fotosensible $Ru(bipy)_3^{3+}$ queda en su estado oxidado en la solución acuosa, listo para ser acoplado al catalizador de oxidación y generar oxígeno.

Como catalizadores de oxidación, para sistemas micelares, se ha experimentado con óxidos de metales de transición como Rutenio, Cobalto o Niquel. El RuO_2 en forma de macrodispersión coloidal con superficie hidrofílica ha demostrado ser eficiente en la transferencia de cuatro electrones desde el oxígeno hasta el $Ru(bipy)_3^{3+}$, elemento fotosensible en forma oxidada que se encuentra en el seno de la solución, y que se pone en contacto con la superficie hidrofílica del RuO_2 , para llevar a cabo la reacción de oxidación.

El mecanismo de la formación de oxígeno molecular en la superficie del RuO_2 se representa en la siguiente figura:

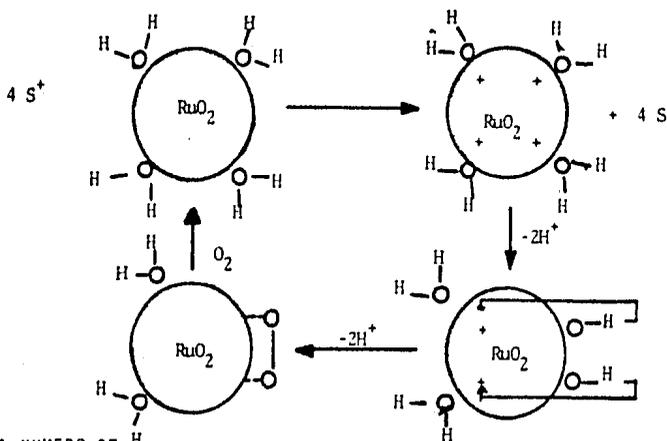


FIGURA NUMERO 37
MECANISMO DE LA GENERACION DE OXIGENO EN PARTICULAS DE RuO₂ HIDRATADO

El ciclo cerrado para el desprendimiento de hidrógeno y oxígeno, en un sistema fotoquímico estabilizado por micelas-puede representarse mediante el siguiente esquema:

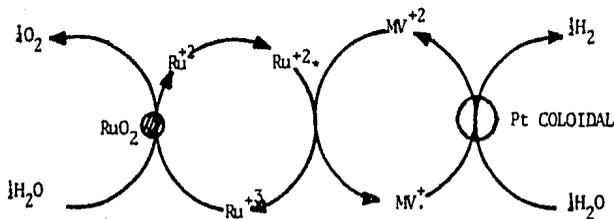


FIGURA NUMERO 38. ESQUEMA DEL DESPRENDIMIENTO DE O₂ Y H₂ EN UN SISTEMA ESTABILIZADO POR MICELAS

En la práctica se ha demostrado que una dispersión en solución acuosa que contenga Platino en forma coloidal recubierto por un surfactante, formando micelas, RuO₂ en macrodispersión, una molécula fotosensible como Ru(bipy)₃²⁺, metilviologeno o C₁₄MV²⁺, produce dos gases, hidrógeno y oxígeno en forma simultánea. El éxito de este sistema depende en forma crítica de la elección del recubrimiento de las micropartículas de Platino. El rendimiento cuántico de esta fotodescomposición es de aproximadamente 1.5 x 10⁻³. (33)

Para la aplicación práctica de este proceso, es necesario separar en forma física, la generación de hidrógeno de la generación de oxígeno. El sistema diseñado para este fin, se representa en el siguiente esquema:

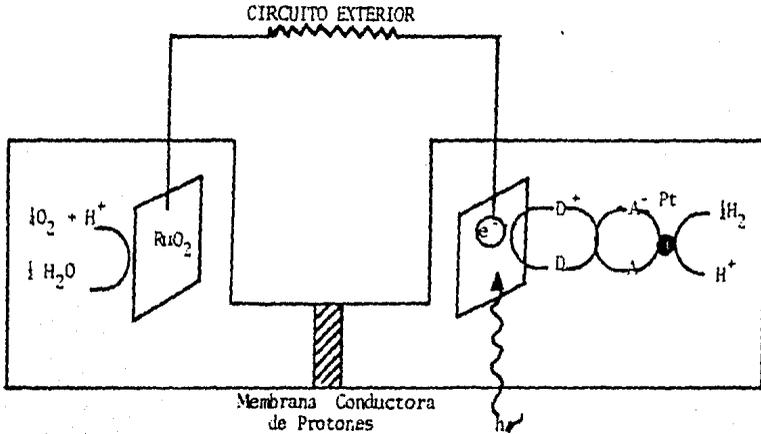


FIGURA NUMER 39 SISTEMA PARA EL DESPREMIENTO DE HIDROGENO Y OXIGENO EN CELDAS SEPARADAS.

El compartimiento correspondiente al ánodo contiene únicamente agua y un electrodo de RuO_2 , manteniéndose en la oscuridad, y se acopla, por medio de un circuito externo y de una membrana conductora de cationes, con la media celda del cátodo. Esta última contiene la molécula fotosensible, el $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$, una molécula aceptora-reductora como el metilviologenio MV^+ o el C_{14}MV^+ , el catalizador de Platino, con un recubrimiento hidrofóbico. (33)

ESTABILIZACION DE LOS INTERMEDIARIOS DE OXIDO-REDUCCION POR MICROEMULSIONES:

Las moléculas de surfactante también forman micelas en los solventes orgánicos, en forma similar que en agua, sola-

mente que la parte polar del surfactante se orienta hacia el interior, mientras la cadena hidrocarbonada hacia el exterior, dando lugar a una microemulsión de pequeñas gotas de agua en la fase orgánica continua.

Se han realizado estudios para comprobar la transferencia electrónica a través de la interfase agua-aceite, entre un donador situado en la fase acuosa y un aceptor en la fase orgánica continua; este proceso puede ser dividido en dos etapas, la transferencia electrónica desde el agua hasta un aceptor localizado en la interfase, y la transferencia desde la interfase hasta la fase orgánica. La primera etapa de transferencia se ha llevado a cabo en una microemulsión utilizando EDTA como donador y nuevamente el $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$ como elemento fotosensible, los cuales se encuentran disueltos en la fase acuosa, mientras el aceptor electrónico, que es el Hexadecilmetilviologeno ($\text{C}_{16}\text{MV}^{2+}$), estará localizado en el límite de la interfase, debido a su comportamiento hidrofóbico o hidrofílico, según su estado de oxidación.

La transferencia electrónica se comprueba determinando la presencia del hexadecilmetilviologeno reducido espectrofotométricamente, verificándose, además, su estabilización por el sistema de microemulsión.

Para realizar la segunda etapa que consiste en la transferencia electrónica desde la interfase hasta la fase orgánica, se utiliza un segundo aceptor electrónico (A_{II}) además de un aceptor electrónico (A_{I}). Se han obtenido resultados positivos utilizando Benzilnicotinamida (A_{I}), situado en la interfase y un indicador: el 4-dimetilaminobenceno (A_{II}), situado en la fase orgánica continua. El transcurso de la transferencia electrónica puede ser seguido espectrofotométricamente, gracias al indicador azoico. (78) Como resultado final de ambas etapas se reduce el 4-dimetilaminoazobenceno, situado en la fase orgánica continua por el EDTA que se encuentra en la fase acuosa, en el interior de la microemulsión. (78)

Ambas etapas pueden representarse:

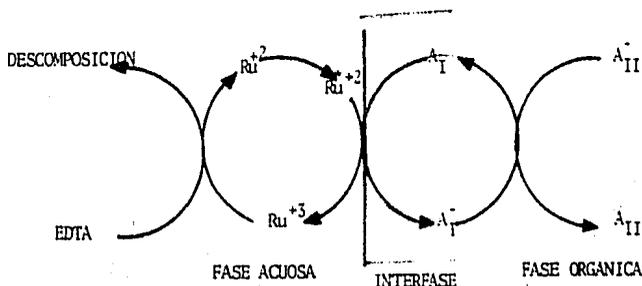


FIGURA NUMERO 40. FOTOTRANSFERENCIA ELECTRONICA A TRAVES DE LA INTERFASE DE UNA MICROEMULSION

El sistema completo de descomposición del agua está formado por dos medias celdas, que se encuentran en dos gotas de agua en la microemulsión. Se utilizan dos moléculas fotosensibles, FS_I y FS_{II} , por lo tanto, el proceso completo es bifotónico, esto es, se realiza en dos fotoactos.

Con la absorción de luz por las moléculas fotosensibles se produce la oxidación de una molécula donadora D_I en el interior de una celda, y la reducción de una molécula aceptora A_{II} en el interior de la otra celda, y en forma complementaria, se produce un aceptor reducido A_I y un donador oxidado D_{II} , que se encuentran en la fase orgánica. Las reacciones de recombinación se inhiben debido a la introducción de las interfases. Las dos medias celdas están conectadas entre sí por un transportador de electrones y protones.

En este fotosistema estabilizado por microemulsiones, todos los componentes, excepto el agua, siguen un camino cíclico. (78)

ESTABILIZACION DE LOS INTERMEDIARIOS DE OXIDO-REDUCCION POR VESICULAS:

ESQUEMA GENERAL PARA FOTODESCOMPOSICION DE AGUA USANDO DOS MEDIAS

CELAS DE MICROEMULSIONES AGUA EN TOLUENO

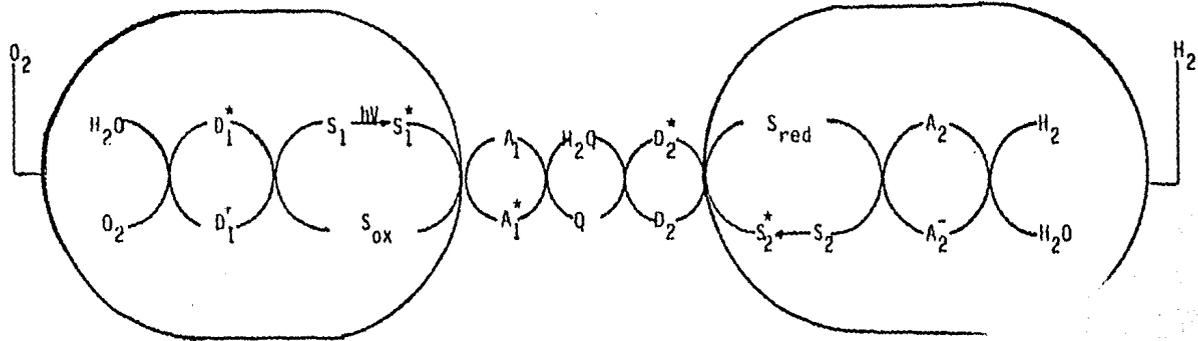


FIGURA NUMERO 41.

El aparato fotosintético natural está constituido por membranas de naturaleza lipo-proteica, cuya función es sostener los componentes de la fotosíntesis y estabilizar los intermediarios de oxidación-reducción, de tal manera, que la energía del electrón pueda ser conservada y transportada a través de varios compuestos acarreadores hasta su destino final. Las membranas son asimétricas con respecto a las especies donadoras yceptoras de electrones, los cuales, son transferidos de un lado a otro de la membrana. (10)

La fabricación de membranas como las naturales, para un sistema artificial, resultaría demasiado complejo e involucraría el desarrollo de técnicas muy sofisticadas; es mucho más fácil la construcción de vesículas que imitan el funcionamiento de la membrana, para llevar a cabo la transferencia electrónica en la fotosíntesis artificial.

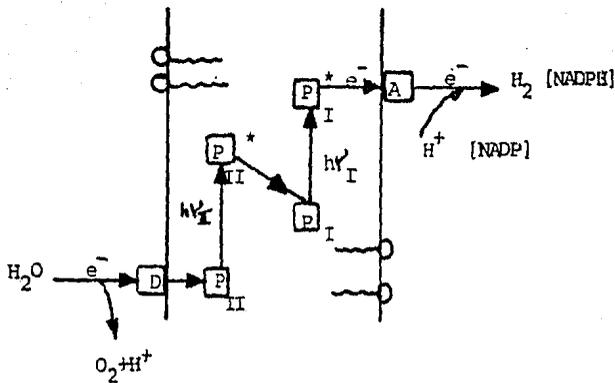


FIGURA NUM.42 MEMBRANA FOTOSINTETICA

Una vesícula puede definirse como una simple esfera formada por una capa bilipídica, que contiene agua en su interior, así como en el exterior, esto es, posee dos interfases agua-lípido, una presente en el exterior de la vesícula, y la otra, en el interior. Se puede considerar a las vesículas como liposomas, en los que se producirá el proceso de conversión cuántica.

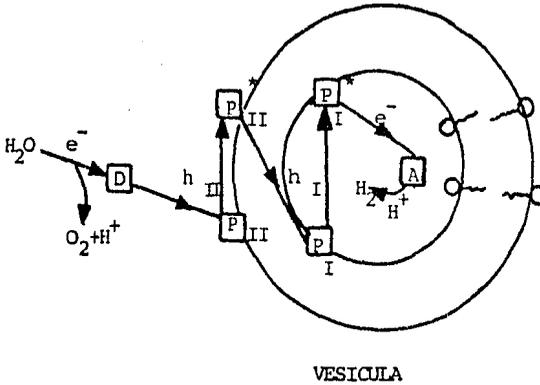


FIGURA NUMERO 42
CONTINUACION

Utilizando el sistema fotoquímico común, consistente en un elemento fotosensible, un reductor y un donador se comprobó la factibilidad de la fototransferencia electrónica a través de las paredes de una vesícula o liposoma, que está constituida por la fosfatidilcolina, un fosfolípido procedente de la yema del huevo, con un grosor de aproximadamente 50 Å. En el interior de las paredes de la vesícula se introdujo -- Quinona, que funciona como acarreador de electrones y carborano*, que es quien transporta los protones a través de la -- membrana. El $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$, comunmente utilizado como elemento fotosensible, que presenta un comportamiento hidrofílico, es sustituido por el NN'-dihexadecil-2-2' biperidin-4,4 dicarboxiamida-Rutenio (II), compuesto similar al $\text{Ru}(\text{bipy})_3^{2+}$, que presenta dos sustituyentes carboxiamídicos de 16 átomos de carbono en los anillos de un ligante de biperidina. Esta molécula presenta características surfactantes y puede ser introducida en las paredes de la membrana, quedando así, situada en los límites de las dos interfases, interior y exterior de la vesícula. (78, 10, 11)

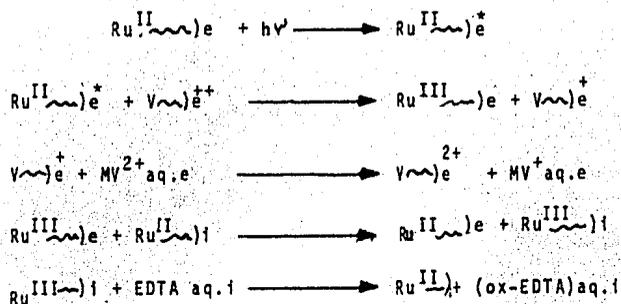
Como reductor se utiliza el metilviologeno (MV^{2+}) que es hidrofílico y por lo tanto permanece en la solución acuosa en el exterior de la vesícula y como donador electrónico, interviene el EDTA, en la solución acuosa en el interior de la vesícula.

* Decaclorocarborano

La reducción del Metilviologeno por el EDTA, que se oxi da, descomponiéndose, puede ser registrada espectrofotométricamente, debido a la intensa banda de absorción del MV⁺ reducido, en el espectro visible, quedando perfectamente demostrada la fototransferencia electrónica a través de las paredes de una vesícula o liposoma.

Este experimento, también, se llevó a cabo, sin los --- transportadores de electrones y protones, quinona y borano,** y no se observó cambio significativo alguno.

La reacción, sin embargo, se llevaba a cabo muy lentamente (con y sin los transportadores); debido a que la probabilidad de que tanto el donador como el aceptor se encontraran, a un tiempo, cerca del elemento fotosensible, durante el cortotiem po de vida de su estado excitado, era muy pequeña. Por lo que se introdujo, en el interior de las paredes de la vesícula un derivado surfactante del reductor, Hexadecilmetilviologeno (HV²⁺), en equilibrio isoelectrónico con el metilviologeno del exterior de la vesícula, incrementándose notablemente la velocidad, así como, el rendimiento cuántico de la reacción. El mecanismo de la transferencia electrónica se muestra a continuación. (10)



donde: --- = derivado surfactante en el interior de la membrana

FIGURA 43

e = exterior a la vesícula
i = interior a la vesícula

** Decaclorocarborano

Resultados similares, en un sistema más sencillo, se obtienen eliminando el hexadecilmetilviologeno del interior de la pseudomembrana y sustituyendo el metilviologeno de la fase acuosa externa por heptilmetilviologeno (C_7MV^{2+}) en exceso el cual se distribuye cubriendo la superficie de la vesícula y en el seno de la solución, estando así, cerca del elemento fotosensible. (11)

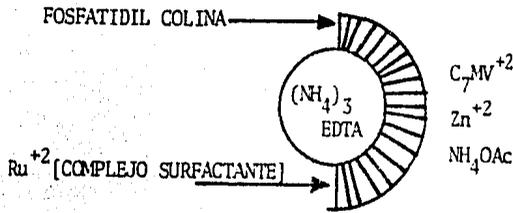


FIGURA NUMERO 44. CORTE TRANSVERSAL DE UNA VESICULA

El mecanismo de transferencia electrónica utilizando el heptilmetilviologeno se muestra a continuación:

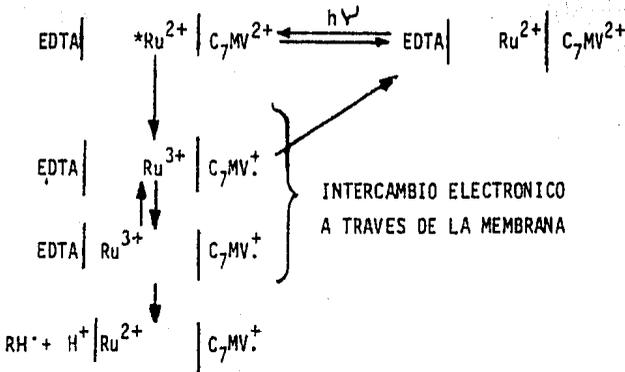


FIGURA NUMERO 45. ESQUEMA DE LA FOTOREDUCCION DEL HEPTIL METIL VIOLOGENO

La transferencia electrónica en el interior de la membrana es un proceso de intercambio isoelectrónico y no una reac

ción de difusión electrónica, en que la velocidad de transporte a través de la membrana es lo suficientemente elevada para competir en forma eficiente con las reacciones de recombinación (11)

En sí, la estabilización de los intermediarios de óxido-reducción por medio de vesículas, resulta más eficiente que los sistemas anteriormente mencionados, por lo que ha significado un avance en los sistemas artificiales de fotólisis del agua.

- Fotogeneración de hidrógeno y oxígeno en sistemas vesiculares: La fotólisis de agua y el desprendimiento de hidrógeno y oxígeno en vesículas bilipídicas se lleva a cabo en celdas separadas conectadas por un transportador electrónico como el sistema Quinona/Hidroquinona, utilizando dos sistemas-fotosensibles, uno en cada celda, en un proceso bifotónico, esto es, un proceso consistente en dos fotoactos.

Para su completa realización, es necesaria la presencia de catalizadores de oxidación y de reducción, que acoplen la transferencia de dos y cuatro electrones, respectivamente.

- Catalizador de Reducción: En la reducción para producir hidrógeno, se han utilizado, comúnmente, catálisis heterogénea con Pt o PtO_2 , así como, Platino coloidal. También se han utilizado complejos de Rodio y de Cobalto (III). En estudios realizados recientemente (33) se ha determinado la eficiencia de varios sistemas de catálisis como Rh (3%) en soporte de $SrTiO_3$, Pt (4%) en soporte de $SrTiO_3$, K_2PtCl_4 , Pt-recubierto con alcohol polivinílico, PtO_x , RuO_x en soporte de Zeolita, entre otros, en un sistema fotoquímico constituido por $Ru(bipy)_3^{2+}$, MV^{2+} y EDTA, y se observó que el Platino y el Rodio en soportes que actúan como semiconductores como el $SrTiO_3$ son los más eficientes en la generación de hidrógeno.

- Catalizador de Oxidación: Se han utilizado óxido metálicos como el RuO_2 en catálisis heterogénea, cuyo mecanismo de

acción fue mostrado anteriormente.

En los sistemas fotosintéticos naturales, el catalizador presente en el desprendimiento de oxígeno es un complejo de Manganese, cuya estructura aún no ha sido determinada. Sin embargo, gracias a estudios de fluorescencia de rayos X, se ha observado que es un catalizador en que dos átomos de Mn se encuentran a una muy corta distancia entre si, que pueden corresponder a un complejo binuclear o a dos moléculas que actúan en forma coordinada para llevar a cabo el desprendimiento de oxígeno.

Utilizando la fotosíntesis natural como modelo, se ha investigado el comportamiento de varios compuestos de Manganese, así como, su eficiencia como catalizadores. Un experimento importante en este sentido, se realizó sustituyendo el complejo surfactante fotosensible de Rutenio de las paredes de las vesículas por un complejo porfirínico de Manganese, el cual actuaría como elemento fotosensible y como catalizador de oxidación; el mecanismo propuesto, involucra, como en la fotosíntesis natural, la acción concertada de dos átomos de Manganese, que se combinan con dos átomos de oxígeno para liberar oxígeno molecular.

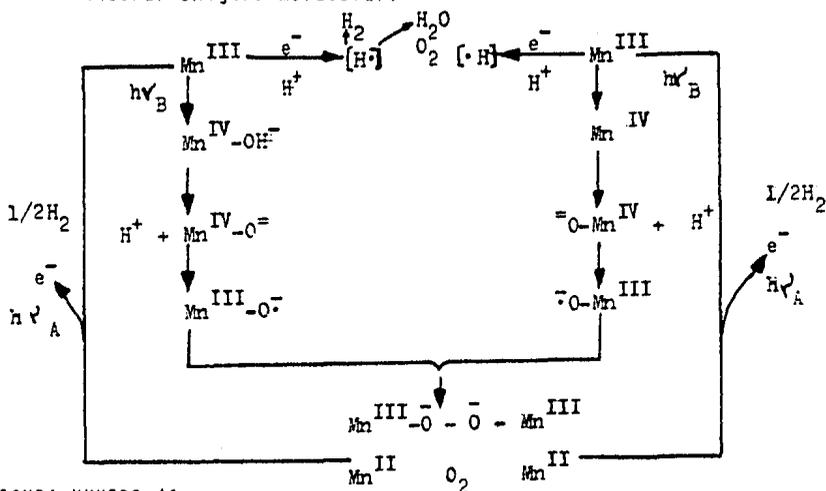
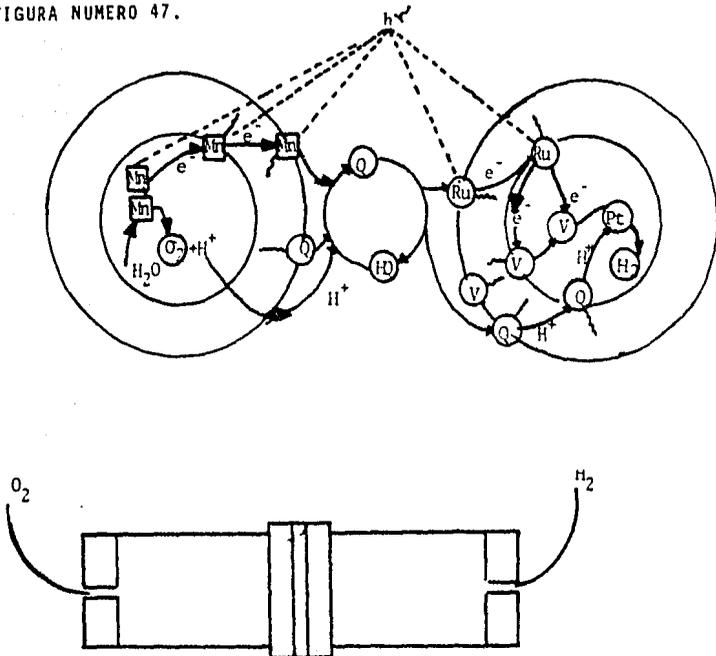


FIGURA NUMERO 46.

SISTEMAS DE FOTOLISIS DEL AGUA UTILIZANDO MICELAS:

La fotogeneración de hidrógeno y oxígeno puede llevarse a cabo en forma práctica utilizando tubos de fibra de vidrio huecos, en los que se realiza la fotosíntesis artificial, en dos celdas, una de oxidación y otra de reducción, conectadas entre sí por el sistema Quinona/Hidroquinona. El siguiente esquema es una representación de un corte transversal del tubo, en que se ha ejemplificado su funcionamiento, utilizando un sistema fotoquímico con un complejo de Manganeso.(11)

FIGURA NUMERO 47.



FOTOGENERACION DE HIDROGENO Y OXIGENO EN UN SISTEMA ESTABILIZADO POR VESICULAS

Otro sistema práctico de fotogeneración de hidrógeno y oxígeno, consiste en suspender las vesículas fotosintéticas en un gel o en un compuesto que por polimerización o por cambio de temperatura se convierta en un gel, quedando así inmovilizadas en unas columnas, a través de las cuales circula una solución de un aceptor y una solución de un donador, uno en cada una de las columnas o celdas, y quedan conectadas entre sí, ambas celdas, electroquímicamente por dos electrodos y un puente salino.

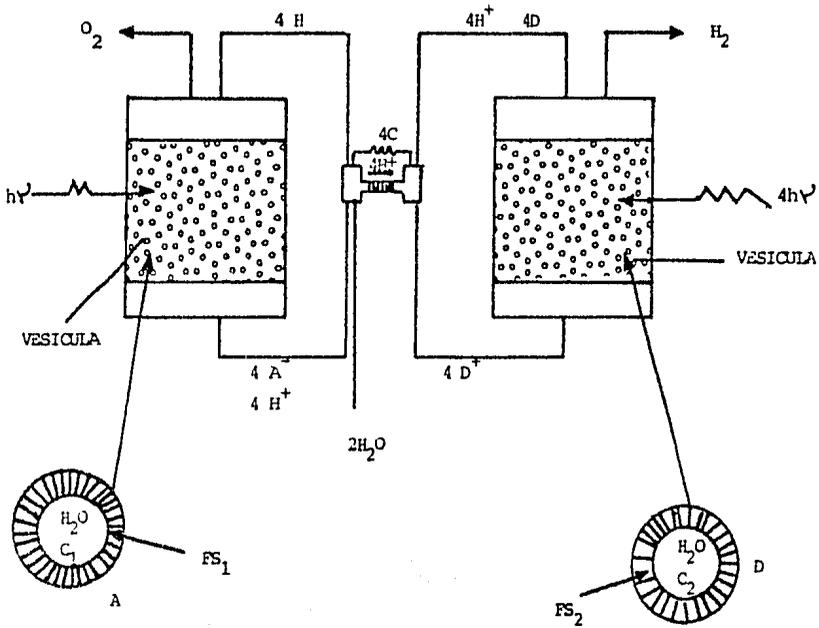
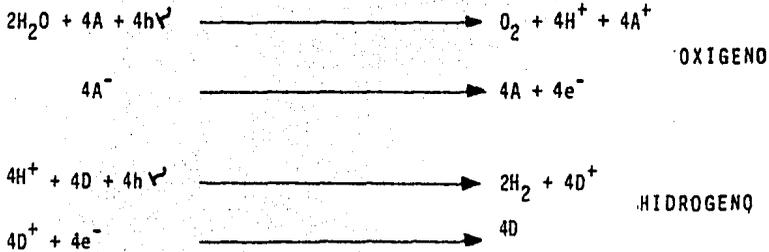


FIGURA NUMERO 48. SISTEMA PARA LA FOTODECOMPOSICION DE AGUA POR VESICULAS

Las reacciones que se lleva a cabo en el fotosistema anteriormente descrito, son las siguientes: (78)



El resultado final:



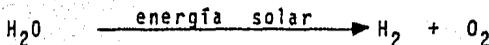
FIGURA NUM. 49

EL HIDROGENO COMO COMBUSTIBLE:

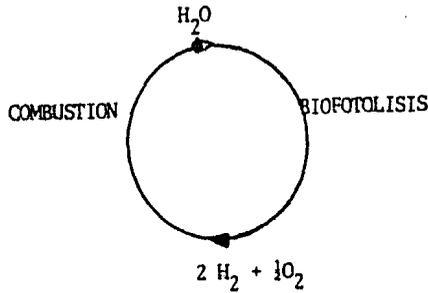
Un problema central de la explotación de la energía solar es conseguir almacenarla para contrarrestar su carácter variable. Una solución es la conversión en compuestos químicos, fáciles de almacenar y transportar, susceptibles de liberar su energía en el momento en que se desee. La fijación de energía solar en forma de hidrógeno es una de las mejores soluciones (75)

Se calcula que el hidrógeno comenzará a remplazar a los combustibles fósiles a partir de los años 2010 - 2020 o antes inclusive, si se considera el creciente peligro de contaminación por el efecto invernadero, debido al gas carbónico. (74)

La principal fuente de hidrógeno es el agua, que por descomposición produce además oxígeno.



y a su vez, la combustión del hidrógeno con el oxígeno atmosférico, produce agua, cerrándose así el ciclo.



El hidrógeno es un gas muy energético, produce 140 MJ por Kilogramo, contra 40 MJ por kilogramo aproximadamente obtenido por combustión de productos del petróleo, además, su baja densidad, la alta velocidad de transmisión de flama, la amplitud del margen máximo y mínimo de inflamación cuando entra en contacto con el oxígeno atmosférico (4-74%) y su baja energía de ignición, hacen del hidrógeno un combustible excelente. (32)

El hidrógeno no es tóxico, no es contaminante, su uso en la industria y en los programas espaciales ha demostrado que es seguro, su grado de peligrosidad es comparable al de la gasolina. (74)

Su obtención a partir de energía solar puede llevarse a cabo por los siguientes métodos:

- Disociación directa del agua (método térmico)
- Disociación del agua mediante ciclos termodinámicos
- Disociación del agua por fotosíntesis artificial

El hidrógeno puede ser almacenado en tres diferentes formas: como gas a altas presiones (3600 - 1800 lb/pul²) en cilindros o en cavidades subterráneas, como gas absorbido, bajo presión en aleaciones intermetálicas (NiH₅); o en forma de líquido en recipientes criogénicos. (75)

Las posibilidades de utilización del hidrógeno son in--

mentas, como intermediario químico, como materia prima en la síntesis del amoníaco para la fabricación de ábonos, como reductor de sustitución en metalurgia, etc.

El oxígeno resultante del rompimiento del agua puede ser liberado a la atmósfera, ser utilizado como oxidante químico en varios procesos y en el tratamiento de aguas negras en las lagunas de oxidación o bien, puede ser almacenado a presión y combinarse con el hidrógeno en una celda energética. (32)

CONCLUSIONES

En los últimos tiempos el mundo ha experimentado profundas transformaciones, y uno de los factores más importantes, que adquiere particular relieve, reside en el uso de la energía. Las tendencias sociales indican que durante las próximas décadas se producirá un aumento en la demanda de energía, que un sistema basado en recursos no renovables no podrá satisfacer.

La energía nuclear representa un recurso que podría suplir completamente al petróleo, si se vencieran los riesgos de su operación y los impedimentos tecnológicos implícitos en su desarrollo, así como, las repercusiones nocivas al ambiente.

La enorme magnitud de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, es superior a todas las necesidades energéticas previsibles, en un mundo industrializado, por lo que representa un meta técnica sumamente atractiva.

La energía solar es una fuente energética renovable e inagotable, mediante su desarrollo y utilización se pondrá fin a la dependencia hacia las fuentes fósiles no renovables, que producen continuo aumento en los precios de la energía y provocan problemas económicos. La energía solar, además, está en consonancia con el medio ambiente.

El carácter intermitente de esta fuente energética ha impedido su completo desarrollo, es necesario almacenarla para compensar su variación diaria; el estudio de la captura de la energía solar por las plantas, su almacenamiento en compuestos químicos y el proceso bioquímico de degradación de estos últimos, ha conducido a la investigación de varios métodos para el almacenamiento de este importante recurso: obtención de alcoholes y biogas a partir de la conversión biológica de los carbohidratos, el cultivo de plan-

tas productoras de hidrocarburos y la generación de hidrógeno mediante sistemas capaces de imitar el proceso fotosintético.

Los compuestos químicos producidos mediante la fotosíntesis, constituyen la biomasa, que para su aprovechamiento como materia prima, es posible clasificarla en tres grupos: la biomasa primaria, que es aquella que se produce con fines determinados, la biomasa secundaria, compuesta por residuos agrícolas y forestales, y la biomasa terciaria, por desechos industriales, ganaderos y municipales. De esta manera, lo que antes se consideraba como desperdicio, ahora debe valorarse como materia prima para su aprovechamiento alimentario, energético e industrial.

A partir de la fermentación anaerobia de la biomasa, se obtienen alcoholes alifáticos de cadena corta, principalmente etanol, los cuales pueden utilizarse en motores y calderas industriales, así como, en el transporte; y biogas, el cual es un combustible valioso, que puede destinarse a uso doméstico, a la producción de energía mecánica o eléctrica, o comprimirse y utilizarse en vez de gasolina en el transporte.

Actualmente, el costo de producción de energéticos a partir de biomasa es superior al de su obtención a partir de fuentes fósiles; el incremento de la superficie destinada al cultivo agrícola y forestal, el aprovechamiento de los terrenos actualmente improductivos, así como, la optimización de los rendimientos y el aprovechamiento de los subproductos, disminuirán los costos de producción, que aunado al inminente incremento de los precios de los combustibles fósiles, la obtención de energéticos a partir de biomasa llegará a ser competitiva.

Existen especies vegetales, como las Euphorbias y las Asclepias, que almacenan la energía solar en forma de hidrocarburos y crecen en forma silvestre en zonas áridas, que son potencialmente utilizables para la producción alternativa de energéticos.

La total domesticación de estas especies y su cultivo en las regiones desérticas de nuestro país, actualmente inútiles para la producción alimentaria, es una meta que requiere del desarrollo de técnicas de manejo agronómico y mejoramiento genético.

Los hidrocarburos producidos por estos vegetales pueden extraerse tal y como son sintetizados normalmente por la planta, y ser sometidos a procesos de cracking y reforming, para obtener compuestos energéticos útiles para la industria y el transporte; o bien, modificar el peso molecular y la estructura de los productos hidrocarbonados producidos por la planta, identificando, tanto el catalizador o enzima, como el agente de superficie, utilizando las posibilidades proporcionadas por la ingeniería genética.

Los residuos agrícolas resultantes de la explotación de estos cultivos, pueden ser aprovechados para la obtención de energéticos por pirólisis o fermentación anaerobia.

El aprovechamiento a gran escala de esta fuente energética, requiere de un mejoramiento en las técnicas de cultivo, así como el uso de nuevas tecnologías de extracción.

En experimentos recientes se analiza la posibilidad de almacenar la energía solar en forma de varios compuestos energéticos, principalmente hidrógeno, producidos al imitar el proceso fotosintético vegetal, mediante sistemas constituidos por varios componentes, como fotosensibilizadores, donadores, aceptores y transportadores electrónicos, utilizando sistemas de interfases, como micelas, microemulsiones y vesículas o liposomas, para estabilizar los intermediarios de fotooxidación y fotoreducción.

Los sistemas fotosintéticos artificiales tienen grandes ventajas sobre los sistemas naturales, ya que no están sujetos a las restricciones impuestas por los procesos vitales, y son inmunes a los virus, hongos y a las plagas de in

sectos y depredadores, y pueden utilizar tierras que actualmente son improductivas para el cultivo agrícola como los desiertos.

El hidrógeno producido mediante estos sistemas es un gas muy energético, no es tóxico, no es contaminante, es un recurso renovable y por tanto, inagotable, que puede ser utilizado tanto en la industria, como en el transporte.

Estas investigaciones se encuentran a un nivel puramente fundamental, y se requiere continuar su estudio, con el fin de vencer algunos impedimentos técnicos para su completa realización práctica.

En cada etapa del desarrollo histórico el hombre ha dependido de una fuente energética, actualmente, la crisis de energía ha llevado a un estudio a nivel mundial de otras fuentes alternativas, perfilándose, como la opción más viable, la diversificación de las fuentes energéticas, utilizando al máximo todos los recursos renovables disponibles, como la energía geotérmica, de las mareas, hidráulica, eólica, y especialmente la energía solar, almacenándola químicamente en alcoholes o hidrógeno, en un sistema energético integrado que se encuentre en armonía con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Arreguín, B., Biochemistry of Guayule Rubber, Guayule, Reencuentro en el Desierto, 251-266, 3a. ed. -- CONACYT, México, D.F., (1978)
- 2.- Bartholte, J.F. et al., Integrated Approach for Utilization of Bioresources for Fuel, Chemical, and Traditional Uses.. Wood and Agricultural Residues, 529-565, Soltes, E.J. Editor, Academic Press, N.Y. (1983)
- 3.- Berkovskij, B.M., Energía para el Mañana, El Correo, UNESCO, (7), 7-9, (1978).
- 4.- Bevernitz, K.J. and Emert, G.H., Economics of a Combined Resource Recovery Cellulose Alcohol Plant., Wood and Agricultural Residues, 217-238, Soltes, E.J. Edit. Academic Press, N.Y. (1983)
- 5.- Boissonnet, F., Energía Solar: la Revancha del Foton sobre el Electrón, Ciencia y Desarrollo, VIII, (46), -60-66, (1982)
- 6.- Brooks, R.E. Bioconversion of Plants Biomass to Ethanol, Proc. Ann. Fuels Biomass. Symp. 1, 511-536, --- (1979)
- 7.- Calvin, M., Hidrocarbons Via Photosynthesis, Guayule, Reencuentro en el Desierto, 103-149, 3a. ed., CONACYT, México, D.F., (1978)
- 8.- Calvin, M., Petroleum Plantations, Solar Energy, Conversion and Storage, Hautala, R.R., King, R.R., Edits. The Humana Press, New Jersey, (1979).
- 9.- Calvin, M. Fermentation and Hidrocarbons, Bioenergy - Levenden Syst. Vortr. Int. Tag., 89-117, (1978)

- 10.- Calvin, M., Synthetic Chloroplasts, Energy Research, 3, 73-87. (1979)
- 11.- Calvin, M., Simulating Photosynthetic Quanta Conversion, Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy., 1-23, Conolly, J.S. Edit., Academic Press, - N.Y., (1981)
- 12.- Calvin, M., Photosynthesis as a Resource for Energy and Materials, Proceedings of the International Rubber Conference, Kuala Lumpur, (1975)
- 13.- Cantarell, A., La Energía Geotérmica, Información Científica y Tecnológica, 5, (82), 20-22, (1983)
- 14.- Castillo, H. y Viqueira, J., Los Energéticos, el Petróleo, y nuestro Futuro, Representaciones y Servicios de Ingeniería, México, D.F., (1980)
- 15.- Chavez, A., Potencial Económico de Especies Vegetales de Zonas Áridas, Ciencia y Desarrollo, 55, 94-106. --- (1984)
- 16.- Commoner, B., Energías Alternativas, Gedisa, S.A., -- Barcelona, (1980)
- 17.- Cook, E., El Flujo de Energía en una Sociedad Industrial, La Energía, 174-195, Scientific American, 3a. ed., Alianza Editorial, S.A., Madrid, (1982)
- 18.- Davis, H.G., et al., Chemistry and Stoichiometry of Wood Liquefaction, Biotechnology and Bioengineering, Symp. N° 11, 151-169, (1981)
- 19.- Doelle, W.H., Bacterial Metabolism, 2a. ed., Academic Press, N.Y. (1975)
- 20.- Elder, T. and Cutter, B.E., Char and Gas Production-

- During Pyrolysis of Southern Pine, Wood and Agricultural Residues, 477-487, Soltes, E.J. Edit. Academic Press., N.Y., (1983)
- 21.- El Hinnawi, E., Los Riesgos del Ciclo Nuclear, El Co-
rreo, UNESCO, (7), 15-17, (1978)
 - 22.- Fan, L.T. et al., Evaluation of Pretreatment for En-
zymatic Conversion of Agricultural Residues, Biotech-
nology and Bioengineering Symp. N°11, 29-45, (1981)
 - 23.- Fernández, J.L., La Energía Solar en México, Su Impor-
tancia Actual y Futura, Información Científica y Tec-
nológica, 6, (93), 51-53, (1984)
 - 24.- Fortes, M., El Origen de la Energía, Información Cien-
tífica y Tecnológica, 5, (82), 11-15, (1983).
 - 25.- Foutch, G.L. and Gaddy, J.L., Culture Studies on the--
Conversion of Corn Stover to Methane, Biotechnology -
and Bioengineering Symp. N°11, 249-262, (1981)
 - 26.- García, M. y Losada, L., Conversión Biológica de la E-
nergía Solar, Mundo Científico, (26), 616-630, (1983)
 - 27.- Gates, D.M., El Flujo de la Energía en la Biosfera,-
La Energía, Scientific American, 92-116, Alianza Edi-
torial, S.A., Madrid, (1982).
 - 28.- Gharpuray, M.N. et. al., Caustic Pretreatment Study-
for Enzimatic Hydrolysis of Wheat Straw, Wood and A--
gricultural Residues, Soltes, E.J., Edit., 369-389,-
Academic Press, N.Y., (1983)
 - 29.- Goldman, G.K., Liquid Fuels form Carbon Chemical --
Process Review, N°57, 2-3, Naves Data Corp. N.J.(1972)
 - 30.- Goldstein, I.S., Acid Process for Cellulose Hydroli-
sis and their Mechanism, Wood and Agricultural Resi-
dues, Soltes, E.J., Ed., 315-328, Academic Press, (1983)

- 31.- Gong, Ch.S., et.al., Conversion of Hemicellulose Carbohidrates, Advances in Biochem Eng. 20. 93-114, (1981)
- 32.- Gooder, E., Alternative Fuels and Direct Conversion-Hydrocarbon Fuels, The McMillan Press, LTD., (1975)
- 33.- Grätzel, M., Photoinduced Water Splitting in Heterogeneous Solution, Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy, Conolly, J.S.Edit., 131-158, Academic Press, N.Y., (1981)
- 34.- Haenel, R., Las Fraguas de Vulcano, El Correo, UNESCO, (7), 26-28, (1978)
- 35.- Hefele, W., Un Reactor que Produce mas Combustible del que Consume, El Correo, UNESCO, (7), 10-12, (1978)
- 36.- Hall, D.O., Fotosíntesis, 3a. ed., Ediciones Omega, S. A. Barcelona, (1983)
- 37.- Han, Y.W., et.al., Treatments to Improve the Digestibility of Crop Residues, Wood and Agricultural Residues Soltes, E.J. Edit., 303-312, Academic Press, N.Y.(1983)
- 38.- Hubert, M.K. Los Recursos energéticos de la Tierra, - La Energía, Scientific American, 3a. ed., 11-43, Alianza Editorial, S.A., Madrid, (1982)
- 39.- Katz, J.J. and Hidnman, J.C., Current Status of Biomimetic Systems for Solar Energy Conversion, Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy, Conolly, J. S. Ed., 27-75, Academic Press, N.Y. (1981)
- 40.- Kaura, N.N., Cellulose and Organic Refuse as Perpetual Source of Liquid Fuels, Chemical Engineering World, (6) 45-48, (1977)
- 41.- Klausmeier, W.H. Configurations for a Forest Refinery, an Interin Report, Wood and Agricultural Residues, Sol

- tes, E.J. Edit., 567-590, Academic Press, N.Y.(1983)
- 42.- Koracic, N. et.al., Fuel Ethanol from Biomass, Production, Economics and Energy, Advances of Biochem-Eng. 20, 119-151, (1980)
- 43.- Krogmann, D.W., The Biochemistry of Green Plants, -- Prentice Hall, Inc, New Jersey, (1973)
- 44.- Kuzminov, V.A., El Carbón, un Combustible Antiguo, - con mucho Futuro, El Correo, UNESCO, 29-30, (1978)
- 45.- La Riviere, J.M. y Da Silva, F.J. Los Microbios Trabajan para Nosotros, El Correo, UNESCO, (7), 31-34. (1978)
- 46.- Lehn, J.M., Photoinduced Generation of Hidrogen and Oxigen from Water, Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy, Connolly, J.S. Edit., Academic Press, 131-158, N.Y. (1981)
- 47.- Lehninger, A. L., Bioquímica, Ediciones Omega, S.A., Barcelona (1972)
- 48.- Levy, P.F. et.al., Development of a Process for Production of Liquid Fuels from Biomass, Biotechnology and Bioengineering, Symp. N°11, 263-274, (1981)
- 49.- Lin, Ch. et.al., Ethanol Production from Xylose by Enzymatic Isomerization and Yeast Fermentation, Biotechnology and Bionegineering, Symp N°11, 455-474, (1981)
- 50.- Lipinsky, E.S., Fuels from Biomass: Integration with Food and Material Systems, Science, 199, 644-650, (1978)
- 51.- Lipinsky, E.S., Disruption and Fractionation of Lignocellulose, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., 489-501, Academic Press, N.Y. (1983)

- 52.- Maiorella, B., Alcohol Production and Recovery, Adv. in Biochem Eng., 20, 44-89, (1980)
- 53.- Marchessault, R.H. The Wood Explosion Process: Characterization and Uses of Lignin-Cellulose Products, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., - 401-413, Academic Press, N.Y. (1983)
- 54.- McIntyre, D., The Chemical Structure of Guayule Rubber, Guayule, Reencuentro en el Desierto, 251-266, - CONACYT, 3a. ed., México, D.F. (1978)
- 55.- Miller, K.R., The Photosynthetic Membrane, Scientific American, 241, (4), 100-13, (1979)
- 56.- Muzzy, J. D., et.al., Pretreatment of Hardwood by Continuous Steam Hydrolysis, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., 351-368, Academic Press, - N.Y. (1983)
- 57.- Pease, R.S., Las Promesas de la Fusión, El Correo, -- UNESCO, (7), 15-17, (1978)
- 58.- Perez.P., El Sol, Nuestra Estrella, Información Científica y Tecnológica, 6, (92), 17-28, (1984)
- 59.- Phillips, J.A. and Humphrey, A.E., Process Technology for the Biological Conversion of Lignocellulosics Material to Fermentable Sugars and Alcohols, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., Academic -- Press, N.Y. 91983)
- 60.- Reed, R.F. et.al., Biomass Gasification for Production of Gaseous and Liquid Fuels, Biotechnology and Bioengineering Symp N°11, 137-150, (1981)
- 61.- Repper, J.L. La Biomasa, Recurso Energético, Información Científica y Tecnológica, 5, (83), 17-18, (1983)

- 62.- Repper, J.L., Energía del Oleaje, Información Científica y Tecnológica, 5, (82), 18-19, (1983)
- 63.- Schafizadeh, F., Thermal Conversion of Cellulosic Materials to Fuels and Chemicals, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., 413-438, Academic Press, - N.Y. (1983)
- 64.- Scharer, J.M., and Young, M.M., Methane Generation by - Anaerobic Digestion of Cellulose Containing Wastes, Adv. in Biochem. Eng. 11, 85-101, (1979)
- 65.- Selke, S.M. and Hawley M.C., Reaction Rates for Liquid Phase HF Saccharification of Wood, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., 329-349, Academic -- Press, N.Y., (1983)
- 66.- Soltes, E.J. et al., Biomass Pyrolysis, Towards an Understanding of its Versatility and Potentials, Biotechnology and Bioengineering Symp N°11, 125-136, (1981)
- 67.- Soltes, E.J., Biomass Degradation Tars as a Source of Chemicals and Fuels Hydrocarbons, Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J. Edit., 477-487, Academic Press, - N.Y. (1983)
- 68.- Starr, Ch., Energía y Potencia, La Energía, Scientific American, 3a. ed., 11-43, Alianza Editorial, Madrid (1982)
- 69.- Summers, C.M., La Conversión de la Energía, La Energía, Scientific American, 92-116, 3a. ed., Alianza Editorial Madrid, (1982)
- 70.- Thompson, N.S., Hemicellulose as a Biomass Resource, - Wood and Agricultural Residues, Soltes, E.J, Edit., -- 101-119, Academic Press, N.Y. (1983)
- 71.- Tonda, J., El Reactor Nuclear, Información Científica y Tecnológica, 5, (83), 45-48, (1983)

- 72.- Toschi, R., Estrategia para la Fusión Nuclear, Información Científica y Tecnológica, 5, (83), 19-22, (1983)
- 73.- Velazquez, M.A. et.al., Revisión Histórica de la Producción de Hule de Guayule en México de 1903-1951. - Guayule, Reencuentro en el Desierto, 3a. ed. 27-71, - CONACYT, México, D.F., (1978)
- 74.- Veziroglu, T.N., El Hidrógeno, un Combustible Limpio e Inextinguible, El Correo, UNESCO, (7), 34-35, (1978)
- 75.- Villiermaux, J. y Ledé, J. Química y Energía Solar, - Mundo Científico, (32), 20-32, (1984)
- 76.- Viniegra, G. y Monroy, H., Biotecnología para el Aprovechamiento de los Desperdicios Orgánicos, A.G.T. Editores, S.A., México, D.F., (1981)
- 77.- Watanabe, Y., Recent Aspects of New Resource for Chemical Industry-Petroleum, CO/H and Biomass Materials, Chemical Economy and Engineering Review, 12, (2), -- 15-22, (1980)
- 78.- Willner, I. et.al., Simulation of Photosynthesis, A Resource for Energy, Bioelectrochemistry, F. Guttman and Kuyzar, H. Edits., Plenum Press, N.Y. 55-81. (1980)
- 79.- Zeikus, J.G., Chemical and Fuel Production by Anaerobic Bacteria, Ann. Rev. of Microbiol., 34, 423-464, (1980)