

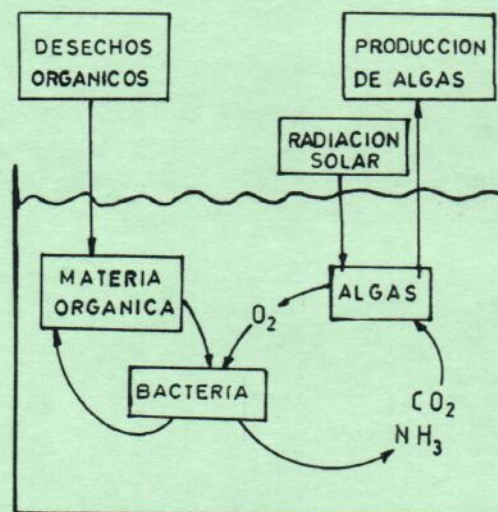


UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

DIRECCION DE EXTENSION

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES

OBTENCION DE ENERGIA DE BIOMASA



Autor: José Fdo. Reyes A.
Ing. Civil Metalurgico

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGRICOLA

Boletin de Extensión N° 26

Marzo 1988

Chillán

OBTENCION DE ENERGIA DE BIOMASA

**José Fernando Reyes Aroca
Ing. Civil Metalúrgico, M.Sc.**

PROLOGO

La biomasa constituye el recurso energético renovable de mayor importancia para nuestra civilización, cuyo desarrollo productivo sostenido, junto al elevado nivel de automatización de los procesos industriales, exige el empleo de enormes cantidades de energía.

Como consecuencia del encarecimiento de los combustibles tradicionales, varios países desarrollados y en vías de desarrollo han comenzado a implementar políticas energéticas que incluyen un aporte importante de biomasa proveniente de productos agrícolas y forestales, para la obtención de combustibles principalmente líquidos y gaseosos a un costo competitivo con los combustibles fósiles.

La intención de este trabajo resumido es orientar a profesionales y agricultores, entregando algunos elementos básicos que permitan cuantificar y clasificar las posibilidades de utilización de la biomasa, pretendiendo servir de análisis preliminar al estudio de literatura especializada en las diversas tecnologías afines.

INDICE DE MATERIAS

<u>CAPITULO</u>		<u>PAGINA</u>
I	INTRODUCCION	1
II	FOTOSINTESIS Y CONVERSION BIOMASICA	4
III	PLANTACION DE ENERGIA SOLAR	15
IV	HIDROLISIS DE CELULOSA	20
V	BIBLIOGRAFIA	23

I. INTRODUCCION

El proceso de conversión de energía solar a una forma química utilizable ha ocurrido en la naturaleza como fotosíntesis desde el comienzo de la vida en la tierra y ha producido todos los combustibles fósiles existentes en el transcurso de millones de años, sin embargo los intentos para explotar tecnológicamente las reacciones fotoquímicas, esto es, sin una planta viva, han sido infructuosos hasta el momento.

El principal inconveniente de la conversión fotosintética y fotoquímica es su baja eficiencia. Mientras que la conversión térmica puede llegar al orden de un 60% de eficiencia, la conversión fotosintética y fotoquímica posee eficiencias inferiores en un orden de magnitud tal como se aprecia en Tabla 1. No obstante, los procesos fotosintéticos son menos intensivos en capital que los procesos de conversión térmica y además no existen impedimentos teóricos para mejorar su eficiencia. Aunque la conversión fotoquímica está aún en etapa de laboratorio, promete un buen futuro en el largo plazo.

TABLA 1. Eficiencia de la Transformación de la Radiación Solar en calor o electricidad.

Método de Conversión o Dispositivo de Transformación.	Eficiencia del método o dispositivo (%)	Eficiencia de transformación en calor (%)	Eficiencia de transformación en electricidad (%)
Transformación de radiación en un evaporador solar con reflector.	65-70	65-75	
Transformación del calor del vapor en energía mecánica en la máquina.	10-30		5-20
Transformación de energía mecánica en electricidad.	90-95		
Vapor a baja presión (2-5 atm) en un evaporador solar con reflector parabolo-cilíndrico.	45-55	45-55	
Transformación de la energía del vapor en energía mecánica.	5-10		2-6
Transformación de energía mecánica en electricidad.	90-95		
Calentadores solares planos de agua hasta 77°C.	30-45	30-45	
Transformación de radiación solar en calor por termoelectrogeneradores en instalaciones con reflectores parabólicos.	60-70		2.5-3.5

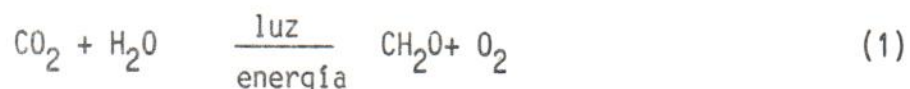
Continúa ...

Método de Conversión o Dispositivo de Transformación	Eficiencia del método o dispositivo (%)	Eficiencia de transformación en calor (%)	Eficiencia de transformación en electricidad (%)
Transformación del calor de los termoelectrogeneradores en electricidad.	4-6		
Transformación directa de radiación solar en electricidad en fotoceldas.	5-15		5-15
Crecimiento de bosques para madera combustible en condiciones naturales.	0.5-15		
Combustión de madera en horno.	70-80	0.35-1.2	0.03-0.34
Energía mecánica obtenida del vapor.	10-30		
Transformación en electricidad.	90-95		
Procesos naturales de transformación de energía radiante en hidroenergía.	0.002		0.002
Transformación de radiación solar por las plantas en energía química potencial-fotosíntesis natural.	0.251		
Transformación de energía del forraje verde en energía muscular por animales (buey, caballo).	35		0.0075-0.05

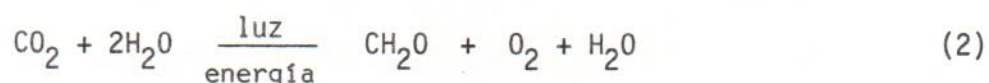
II. FOTOSINTESIS Y CONVERSION BIOMASICA

Todos los seres humanos, plantas y animales necesitan alimento orgánico para su subsistencia, crecimiento y multiplicación. Las plantas verdes sin embargo, difieren de muchos otros organismos debido a que son capaces de reducir el dióxido de carbono atmosférico al nivel de azúcar por medio de la energía radiante del sol. Por lo tanto, ellas son independientes de cualquier suministro externo de combustible oxidable. El proceso mediante el cual las plantas verdes capturan la energía del sol y fabrican compuestos orgánicos a partir del dióxido de carbono y agua se llama fotosíntesis. En este proceso, el cloroplasto es de fundamental importancia ya que constituye el asiento de la actividad fotosintética de las células verdes y el lugar donde actúa la clorofila y los pigmentos accesorios relacionados con la actividad fotosintética. En células de plantas superiores, el cloroplasto tiene forma de disco con dimensiones aproximadas de 4 - 8 μm de diámetro por 1 μm de espesor. Entre 1 y 100 de estos cuerpos están presentes en cada célula. Cuando el cloroplasto absorbe luz de longitud de onda apropiada, el dióxido de carbono es reducido al nivel de azúcar y se libera un volumen de oxígeno gaseoso igual al dióxido reducido. El sentido de estas reacciones químicas es exactamente el inverso de aquellas que ocurren durante la oxidación de alimentos en la respiración. Consecuentemente, las plantas son importantes en el balance energético de la naturaleza, ya que ellas producen alimento para otros organismos y restituyen al aire el oxígeno que estos requieren para la respiración.

Seis unidades de CH_2O producirán $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ que es glucosa. Usando la fórmula CH_2O para designar la unidad básica de carbohidrato, la ecuación fotosintética se puede escribir como :



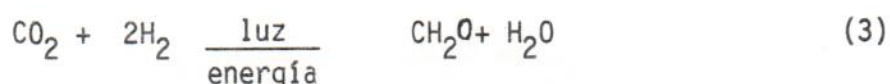
Aunque esta ecuación parece propiamente balanceada, da una impresión errónea sobresimplificada del mecanismo mediante el cual ocurre la reacción fotosintética. Se ha demostrado que el oxígeno liberado en la fotosíntesis no proviene del CO_2 , sino que del agua. En efecto, la fotóli-sis del agua es la llave para la comprensión de la fotosíntesis ya que este es uno de los procesos en los cuales la energía luminosa realmente hace un trabajo químico. Como hay dos átomos de oxígeno producido en la reacción (1) y cada molécula de agua contiene solamente un átomo de oxígeno, al menos dos moléculas de agua deben intervenir en la reacción. Por lo tanto, la ecuación balanceada que representa más correctamente la situación sería:



El oxígeno desprendido en el proceso se deriva del agua que interviene en la reacción y la molécula de agua que se forma difiere de ambas moléculas separadas en el proceso fotolítico. La Figura 1 muestra un esquema donde se pueden visualizar los aspectos básicos de la reacción. De acuerdo a este esquema, la luz quiebra la molécula de agua y libera oxígeno. Al mismo tiempo se produce hidrógeno el cual permite reducir

el CO_2 a CH_2O y producir una nueva molécula de agua.

Los aspectos esenciales del esquema simplificado de la Figura 1, han sido verificados estudiando micro-organismos fotosintéticos. Algunos de estos son algas, cuyo comportamiento bioquímico es similar a las plantas verdes, pero ellas utilizan hidrógeno gaseoso en lugar de agua para reducir CO_2 al nivel de carbohidrato del CH_2O . :



Este esquema también indica que la energía luminosa se usa para dividir (fotolizar) el hidrógeno cuyo poder reductor puede transformar CO_2 a CH_2O .

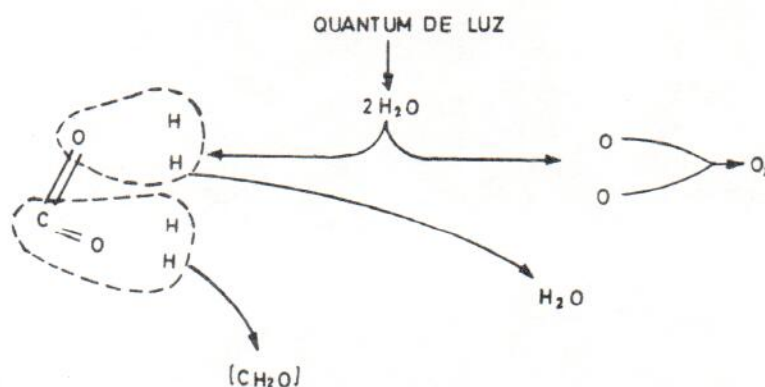


Figura 1. Esquema simplificado del proceso de fotosíntesis.

Para la utilización fotosintética de la energía solar, es importante el límite potencial superior de eficiencia del proceso fotosintético. En plantas de tierra, aproximadamente 0.5 - 2.0% de la luz inci -

dente en cualquier ecosistema se transforma en energía química. Esta eficiencia es importante para conversión biomásica pero no indica el límite teórico superior de fotosíntesis. Gran parte de la radiación incidente se pierde por reflexión, transmisión y absorción inefectiva por otros pigmentos, además de la clorofila, por lo tanto sólo una fracción de esta radiación es absorbida por el pigmento activo. La eficiencia con que se utiliza esta fracción da una indicación del límite superior de la eficiencia teórica del proceso fotoquímico ya que mide el número mínimo de cuantos de luz necesarios para llevar una molécula de CO_2 al nivel energético de carbohidrato. Estudios detallados han demostrado que 8 cuantos de luz roja, conteniendo 320 Kg cal de energía, son suficientes para almacenar el equivalente a 112 Kg cal en forma de materia orgánica. Estas cifras indican que la eficiencia termodinámica neta de la fotosíntesis es aproximadamente 35%. Sin embargo, este concepto de eficiencia no es el adecuado para estimar el límite de potencial económico en la conversión biomásica.

En las condiciones actuales, el rendimiento promedio de un acre de tierra cultivada es aproximadamente 1 tonelada de materia orgánica seca por año debido a que gran parte de la luz incidente en el ecosistema no es atrapada por la clorofila. La perspectiva de incrementar la utilización de productos fotosintéticos y de utilizar la fotosíntesis en procesos artificiales y naturales sería enorme si pudiéramos aprender a incrementar el cociente entre la energía generada y la energía consumida (cociente output/input) mediante el mejoramiento de la productividad, modificación de tipos de cultivos y aumentando la eficiencia de cosecha. Para tener una idea del potencial disponible, de-

be tenerse en cuenta que de la radiación total sobre la superficie de la tierra, la cual es aproximadamente 3×10^{24} J/año, alrededor de 3×10^{21} J de energía se fija como carbono por fotosíntesis. Esto representa energía solar almacenada que el equivalente a 10 veces el consumo mundial en el año 1970 a pesar del hecho que la eficiencia global de conversión de la energía solar por fotosíntesis es sólo aproximadamente 0.1%. Esto indica que el potencial de mejoramiento parece grande, sin embargo, existen muchos inconvenientes que deben ser superados.

Una población mundial de 5×10^9 habitantes consume aproximadamente 1875×10^{16} J/año en alimentos, lo cual representa cerca del 6.25% del carbón fijado fotosintéticamente. La Tabla 2 muestra rendimientos promedio de materia seca producidos en varias condiciones climáticas, y la Figura 2 muestra el rendimiento vegetal anual esperado como función de la radiación solar para varias eficiencias fotosintéticas. La Tabla 2 muestra que en la actualidad, las eficiencias fotosintéticas varían entre 0.6 y 1.6%. La Tabla 3 presenta una estimación de los valores de eficiencia fotosintética máximos obtenibles. Alrededor del 50% de la radiación es inutilizable para la conversión fotosintética debido a que cae fuera del rango de longitudes de onda que las plantas pueden utilizar. Parece imposible reducir la reflexión, absorción y transmisión de esta radiación a través de hojas y tallos a menos de un 20%. De la radiación resultante, existe un 77% de pérdida de acuerdo a los requerimientos de fijación de CO_2 en luz de 680 nm de longitud de onda asumiendo que se requieren 10 cuantos por molécula de CO_2

TABLA 2. Rendimientos promedio anuales de materia seca.

Materia seca	Rendimiento		Eficiencia fotosintética (% de radiación total)
	(ton/há.año)	(g/m ² .día)	
TROPICAL			
Pasto Napier	88	24	1.6
Caña de azúcar	66	18	1.2
Junquillo	59	16	1.1
Cultivos anuales	30	-	-
Cultivos perennes	75-80	-	-
Bosque	35-50	-	-
TEMPLADO			
Cultivos perennes	29	8	1.0
Cultivos anuales	22	6	0.8
Pradera artificial	22	6	0.8
Bosque perenne	22	6	0.8
Bosque caduco	15	4	0.6
Pradera natural	11	3	-
DESERTICO	1	0.3	0.02

TABLA 3. Eficiencia Fotosintética y Pérdidas de Energía

Pérdidas de energía	Energía luminosa disponible (%)
- A nivel del mar	100
- 50% ya que la luz utilizable es aquella entre 400 y 700 nm	50
- 20% debido a la reflexión, absorción y transmisión	40
- 77% debido a la eficiencia energética en la fijación de CO ₂ (asumiendo 10 cuantos/CO ₂) y que el contenido energético de la luz roja de 575 nm es la radiación peak de la luz visible)	9.2
- 40% debido a la respiración	5.5

y que el contenido de energía de la luz roja (575 nm) es el peak de radiación de la luz visible. A esto hay que agregar un 40% de pérdida debido a la respiración con lo cual se obtiene una eficiencia fotosintética máxima posible de aproximadamente 5.5%. Actualmente, bajo condiciones favorables, en la práctica la fotosíntesis entrega una eficiencia del orden del 1% anualmente, aunque ciertos cultivos tales como caña de azúcar en algunos lugares pueden proporcionar hasta eficiencias de 3%. La Tabla 4 muestra rendimientos en el corto plazo para algunos cultivos en términos de peso seco y en condiciones óptimas de crecimiento de las plantas.

Bajo condiciones de ambiente controlado (invernadero) es posible el cultivo de alta productividad en que se obtiene un máximo de energía con un mínimo de gasto energético. Para esto, tanto en clima templado como clima cálido es crucial optimizar las estructuras de los edi-

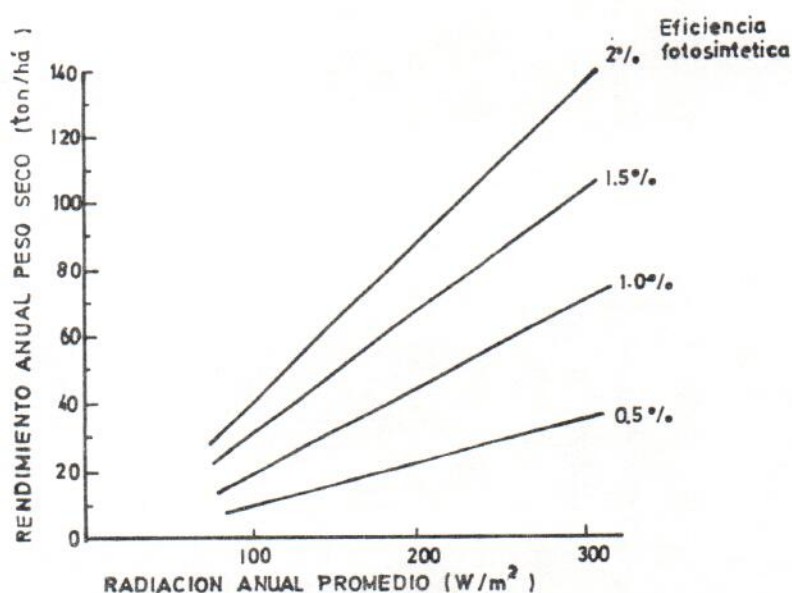


Figura 2. Rendimientos anuales esperados en función de la radiación para varias eficiencias fotosintéticas.

TABLA 4. Eficiencia y Rendimiento a corto plazo de cultivos

Cultivo	País	Rendimiento (g/m ² .día)	Eficiencia fotosin- tética (% de radiā- ción total)
CLIMA TEMPLADO			
Caña	Inglaterra	43	3.5
Centeno	Inglaterra	28	2.5
Pie de gallo	Inglaterra	40	3.3
Remolacha	Inglaterra	31	4.3
Col	Inglaterra	21	2.2
Cebada	Inglaterra	23	1.8
Maíz	Inglaterra	24	3.4
Trigo	Holanda	18	1.7
Arvejas	Holanda	20	1.9
Trébol Rosado	Nueva Zelandia	23	1.9
Maíz	Nueva Zelandia	29	2.7
Maíz	Kentucky U.S.	40	3.4
CLIMA SUBTROPICAL			
Alfalfa	California U.S.	23	1.4
Papas	California U.S.	37	2.3
Pino	Australia	41	2.7
Algodón	Georgia U.S.	27	2.1
Arroz	Australia	23	1.4
Caña de azúcar	Texas U.S.	31	2.8
Pasto Sudan	California U.S.	51	3.0
Maíz	California U.S.	52	2.9
Algas	California U.S.	24	1.5
CLIMA TROPICAL			
Casava	Malasia	18	2.0
Arroz	Tanzania	17	1.7
Arroz	Filipinas	27	2.9

Cultivo	País	Rendimiento (g/m ² .día)	Eficiencia fotosintética (% de radiación total)
Aceite de Palma	Malasia	11	1.4
Pasto Napier	El Salvador	39	4.2
Mijo	Australia	54	4.3
Caña de azúcar	Hawai	37	3.8
Maíz	Tailandia	31	2.7

ficios utilizados. Bajo estas condiciones de invernadero podría ser posible manipular la concentración de CO₂ de la atmósfera, con lo cual se ha demostrado que es posible incrementar considerablemente el rendimiento de los cultivos al disponerse de CO₂ suficiente para el crecimiento potencial pleno de las plantas. Adicionalmente, bajo condiciones de alta disponibilidad de CO₂, se incrementa la capacidad inherente de fijación de nitrógeno. Se ha demostrado recientemente que la limitación en la fijación del nitrógeno de las plantas no es la bacteria sino que la falta de eficiencia fotosintética y los productos fijados de carbón, que se traslocan a la bacteria en las raíces. Esto sugiere una forma de incrementar el rendimiento y disminuir los requerimientos de fertilizante nitrogenado.

Una vez que la eficiencia fotosintética ha sido suficientemente incrementada, el concepto de plantación energética, es decir, la implantación de los cultivos solamente de acuerdo a su contenido energético parece

ser razonable. Dentro de tal plan, el objetivo es el control del crecimiento de la planta y la utilización del producto final más apropiado, para obtener la máxima energía de salida con el mínimo de energía de entrada. El producto final podría ser convertido en gases licuados, metano y combustibles sólidos mediante pirólisis o fermentación. La celulosa podría también ser degradada para la producción de azúcar o seguir otros procesos similares. Existen sustancias químicas disponibles, capaces de incrementar el tamaño del estoma en las hojas de las plantas con lo cual sería posible incrementar el rendimiento, siempre que exista agua suficiente. Un método para incrementar la eficiencia de la fotosíntesis, que ha sido puesto en práctica es el cultivo artificial de diminutas algas acuáticas en capas delgadas de agua fertilizada.

III. PLANTACION DE ENERGIA SOLAR (PES)

Una plantación de energía es un ecosistema cultivado específicamente por su valor energético. Algunas de las ventajas atribuidas a este tipo de conversión son las siguientes:

1. La energía almacenada es utilizable cuando se desea
2. Genera un recurso energético renovable
3. La tecnología está disponible, no es intensiva en capital y tiene perspectivas de desarrollo a gran escala en un par de décadas.
4. Puede desarrollarse con los recursos humanos y materiales actuales
5. La implementación es razonablemente barata
6. Los riesgos son escasos

Las plantas a usar en una PES deben ser de crecimiento rápido, proporcionar máximo recubrimiento del suelo a través del año y ser tolerantes a las bajas temperaturas e intensidades luminosas que ocurren en invierno. Se deben considerar otros factores tales como sistemas de cultivo, deterioro post-cosecha y sistemas de transporte. Los cultivos que pueden fijar su propio nitrógeno y que requieren poca fertilización adicional son evidentemente ventajosos.

Las plantaciones de energía podrían consistir de bosques de hoja caduca o coníferas que poseen eficiencias fotosintéticas entre 0.4 y 0.8% base anual. Sin embargo, también pueden considerarse otras especies tales como malezas, pastos, cultivos estacionales, arbustos y algas. Se han

identificado cinco especies: Eucaliptus, Cassava, Hibisco, Pasto Napier y Caña de azúcar como cultivos potencialmente deseables, de alto rendimiento que se pueden cosechar a través de todo el año. Se ha estimado por ejemplo, que Brasil podría obtener todo el Suministro actual de energía con el cultivo de cassava en un 1% de la superficie total del país. La cassava se desarrolla muy bien en suelos pobres y rinde 50 ton/há. El almidón es el principal componente y éste permite convertirlo fácilmente en alcohol mediante fermentación, produciendo un combustible que puede competir fácilmente con el petróleo. Además se ha sugerido la posibilidad de cultivar álamos híbridos de rápido crecimiento en forma aun más económica debido a que se produce rebrote de los muñones cortados. Ellos poseen una eficiencia de conversión solar de alrededor de 0.6% base anual. Como dato ilustrativo se estima que con una pluviometría de 0.38 m o más, anualmente, alrededor de 12.200 há serían suficiente para alimentar una planta de energía de 400 Mega Watts a precios competitivos con el petróleo. Las granjas forestales son económicamente más atractivas que los cultivos estacionales debido a que se puede almacenar mayor cantidad de energía en base anual.

En una plantación de energía se pueden producir distintos tipos de combustibles, dentro de los cuales, los sólidos son más deseables, sin embargo, debido a que los productos de cosecha a menudo contienen grandes cantidades de agua, lo cual requiere presecado con gran consumo de energía, a menos que se utilice energía solar, puede ser más conveniente fermentar o pirolizar. En la pirólisis, los productos finales pueden ser gaseosos, líquidos o sólidos siendo en la actualidad empleado a ni-

vel de gran escala para la producción de carbón vegetal. La fermentación genera principalmente alcohol, ácido acético o metano. Otra posibilidad es la reducción química a grandes temperaturas y presiones para la obtención de combustibles de alto poder calorífico. La Figura 3 contiene un diagrama de los procesos alternativos mediante los cuales se puede convertir biomasa en un nuevo producto energético.

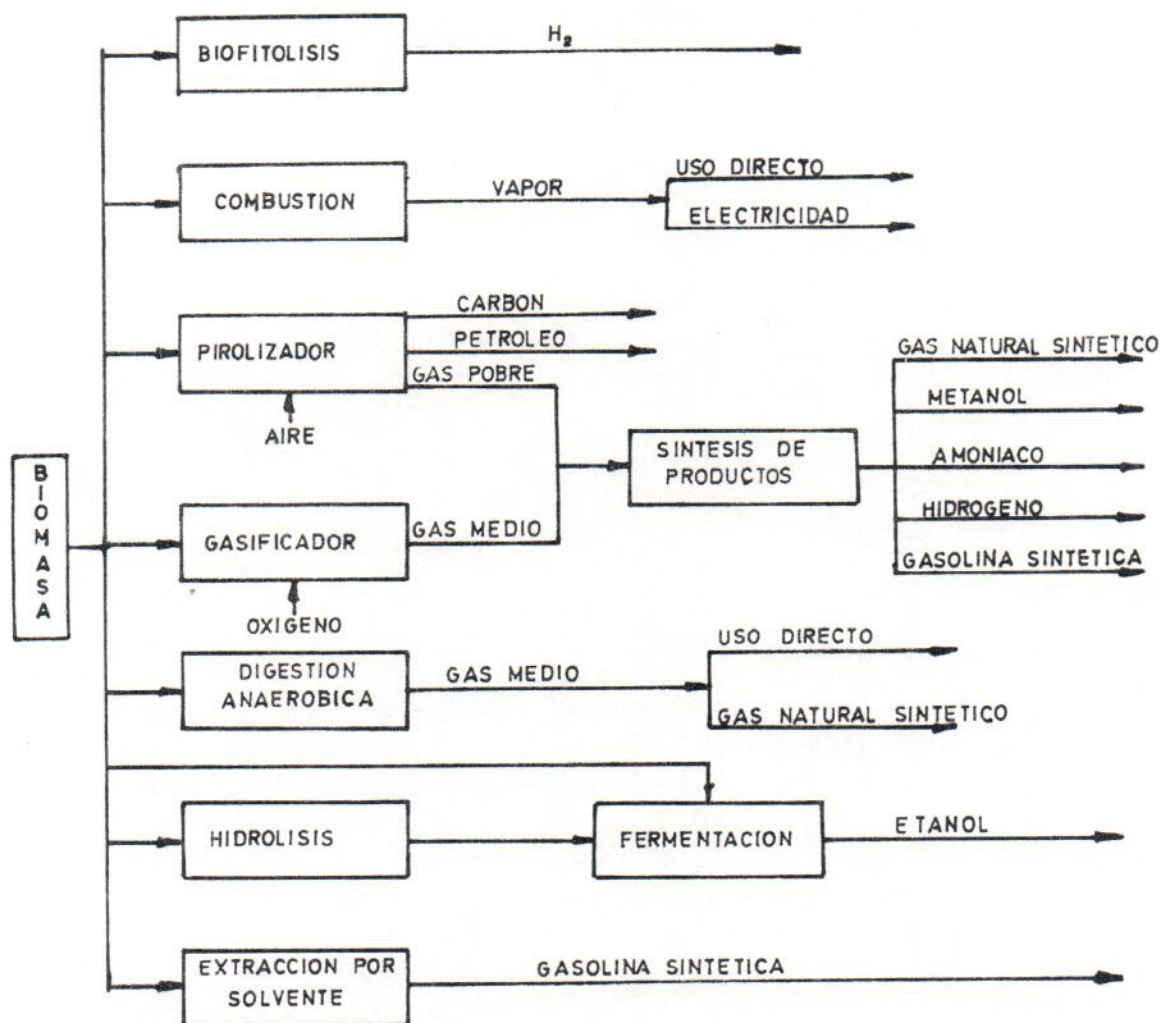


Figura 3. Posibles rutas de conversión de energía y productos desde la biomasa.

De los procesos que usan biomasa para producir energía actualmente en operación comercial, sin duda que el más conocido es la combustión de biomasa con el objeto de producir vapor, ya sea de utilización directa o destinado a la generación de energía eléctrica. Los aspectos económicos del proceso varían de una condición a otra sin embargo, la práctica indica que la madera en general es bastante competitiva con los combustibles convencionales debido a la posibilidad de usar residuos cuando estos se encuentran disponibles.

La digestión anaeróbica está también comenzando a ser usada comercialmente para producir alimentación animal, fertilizantes y gas natural sintético, a partir de excretas animales. Este proceso también podría utilizar cultivos anuales de alto contenido de humedad, tales como pasto sudan, sorgo de forraje, algas, etc. como materia prima para la generación de metano.

Otro proceso de gran aplicación comercial e importancia económica actual especialmente en Brasil es la fermentación para producir etanol a partir fundamentalmente de caña de azúcar y cassava que son los productos agrícolas que presentan mejores perspectivas económicas.

Existen otras tecnologías tales como biofitólisis de agua para producir hidrógeno, la hidrólisis enzimática para producir glucosa y también la extracción por solvente para producir gasolina sintética a partir del látex del guayule (Euphorbia). que aún se encuentran en la etapa experimental y no están suficientemente probadas, por lo tanto es

difícil anticipar cuándo podrán ser técnicamente posibles o económicamente competitivas, no obstante que producen formas de energía de alta calidad.

Una tecnología más promisoría de conversión es la gasificación por pirólisis. Se ha logrado una experiencia considerable en operación comercial respecto de este proceso tanto en Europa como en países del tercer mundo para la generación de gas pobre y producción de electricidad. Esta tecnología se estima que estará plenamente disponible a escala comercial en los próximos años, ya que aparece como una alternativa económicamente competitiva con el gas natural.

IV. HIDROLISIS DE CELULOSA

La celulosa es el mayor componente vegetal y el compuesto orgánico elemental más abundante en la tierra produciéndose actualmente en el mundo alrededor de 10^{11} toneladas al año. Se le puede procesar para producir combustibles, alimentos o compuestos químicos industriales.

El método que se ilustra en la Figura 4 utiliza el tratamiento de hidrólisis enzimática para romper la celulosa. La celulosa convertida en azúcares se puede emplear como fuente de alimento o como combustible líquido, si se le somete a una fermentación adecuada. En general las mejores fuentes de celulosa serán los pastos, tallo de cereales, hibiscos, eucaliptus y álamos.

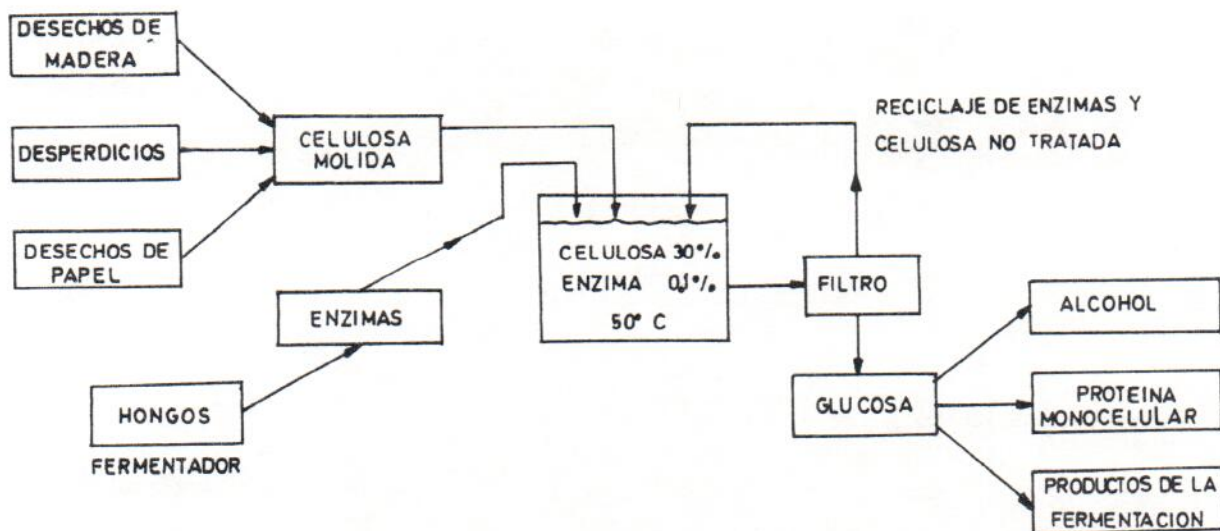


Figura 4. Fermentación de celulosa para producir glucosa.

Se ha propuesto la implantación de cultivos de alto rendimiento en celulosa en ambientes cerrados que conservan el agua y maximizan la fotosíntesis mediante concentraciones elevadas de CO₂ (0.2%). En estas condi-ciones se han observado rendimientos correspondientes a eficiencias de conversión fotosintética de 5% y aun mayores.

La Tabla 5 muestra los incrementos en rendimiento fotosintético que se obtienen al incrementar los niveles de CO₂.

TABLA 5. Rendimientos Fotosintéticos obtenidos con niveles normales y mejorados de CO₂ (*)

	A nivel normal de CO ₂	A nivel mejorado de CO ₂
Maíz, Sorgo, Caña de azúcar	60-75	100
Arroz	40-75	135
Maravilla	50-65	130
Algodón	40-50	100
Soya, Remolacha	30-40	56
Arena, Trigo, Cebada	30-35	66
Tabaco	20-25	67
Tomate, Pepino, Lechuga	20-25	50
Arboles, Uvas, Citrus	10-20	40

(*) Milígramos de CO₂ fijados por cm cuadrado por hora.

Una familia produce un promedio de 15 kg de desperdicios por semana. Alrededor del 60% de esta masa consiste de papel y material vegetal, que sería la fuente de celulosa a ser convertida en alcohol, acetona y otros productos químicos. Una tonelada de papel de desecho produce alrededor de media tonelada de glucosa que rinde 250 litros de alcohol. Por lo tanto, los desperdicios agrícolas y urbanos podrían contribuir considerablemente para satisfacer los requerimientos de energía si se desarrollaran sistemas económicos locales para su recolección y tratamiento.

V. BIBLIOGRAFIA

1. DICKINSON WC. AND CHEREMISINOFF P.N. Solar Energy Technology Handbook. Marcel Dekker Inc. New York, 1980.
2. KREITH F. AND KREIDER J.F. Principles of Solar Engineering. Mc. Graw-Hill. New York, 1978.
3. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. Energy for Rural Development. Washington D.C., 1976.

