

TECNOLOGIAS ENERGETICAS PARA EL DESARROLLO RURAL (1970s)

El texto de abajo es un capítulo de: S. Wionczek, Miguel; Foley, Gerald; y Van Buren, Ariane., *La energía en la transición del sector agrícola de subsistencia*, México, El Colegio de México, 1983, pp. 39-58.

Hubertus E. M. Stassen y Willibrodus P. M. van Swaaij

Durante los últimos diez años la falta de suministros energéticos adecuados ha obstaculizado cada vez más el desarrollo de los sectores rurales de muchos países en desarrollo; en ocasiones incluso ha amenazado su misma supervivencia. Pueden distinguirse dos aspectos principales de esta carencia energética.

En primer lugar, la demanda de madera para leña -la fuente más importante de energía tradicional para usos tales como la cocción y la calefacción ha crecido con más rapidez que el suministro. En consecuencia, muchas personas, especialmente en las áreas rurales, se enfrentan a una crisis energética de inmensa magnitud. En la actualidad, los bosques de los países en desarrollo se consumen a una tasa de 10 a 15 millones de hectáreas ó 1.3 por ciento del total forestal cada año. La deforestación es más seria en las regiones semiáridas y montañosas, en donde se localizan graves problemas de erosión, desertización y sedimentación. Conforme se agota el suministro de leña, se queman los residuos animales y de los cultivos, privando de esta manera al suelo de nutrientes y material condicionante orgánico muy valioso.

En segundo lugar, en el pasado, el desarrollo del sector rural descansó mucho en los combustibles comerciales relativamente baratos. El ascenso de los precios de los productos petroleros, desde 1973, ha afectado seriamente la balanza de pagos de muchos países en desarrollo importadores de petróleo, limitando así su capacidad para proveer a sus áreas rurales con la energía importada requerida para el desarrollo.

A fin de contrarrestar estas tendencias, el mejor enfoque es promover la autosuficiencia rural en la energía, mediante el incremento de la producción energética y la promoción de la sustitución y el uso más efectivo de los recursos indígenas, de preferencia renovables.

La energía para la supervivencia.

Los experimentos con la cocción del arroz¹ muestran que la cantidad de energía necesaria para que el agua alcance su punto de ebullición y después se evapore la cantidad requerida, es de aproximadamente 2 500 KJ/kilogramos de arroz (aproximadamente 17.5 por ciento del contenido energético del arroz). Si se supone que otros cereales alimenticios se comportan de la misma

¹ Revelle, R., 1976, "Energy Use in Rural India", *Science*, 192.

manera y se supone que un adulto, en promedio, necesita cerca de 10 000 KJ/día el 80 por ciento de este insumo energético adopta la forma de cereales, y que 75 por ciento de la energía gastada en preparar los alimentos se utiliza para la cocción de granos, la necesidad energética efectiva puede calcularse aproximadamente en 0.73 GJ/persona/año. Es escasa la información acerca del consumo real de combustible que separa la cocción de otros usos del mismo, pero unas cuantas encuestas^{2,3,4,5} presentan información que varía de 5.7 GJ/persona/año (Bangladesh) a 11.2 GJ/persona/año (Alto Volta) lo que indica que la eficiencia general de la cocción en las circunstancias actuales, varía entre el 6 y el 12 por ciento.

Falta por ver si esta eficiencia puede incrementarse de manera significativa. Aunque con frecuencia se afirma una eficiencia de combustible de hasta 25 por ciento en el caso de las estufas de madera "mejoradas", estas cifras tan sólo tienen sentido cuando la eficiencia se mide con base en un conjunto bien definido de condiciones estandarizadas. Ya que la cocción es un proceso complicado, en el que intervienen un número de factores tales como diferentes periodos de elevación de temperatura, hervor, hervor lento, y así sucesivamente, y porque los hábitos de cocción difieren regionalmente, no siempre existe una relación clara entre las eficiencias medidas y las reales. Es por esto que se necesita un conocimiento íntimo de los hábitos de cocción local para el diseño de estufas de madera "mejoradas", adecuadas; una estufa que funciona bien en una región no necesariamente reduce el consumo de combustible en otra.

Además del uso final más eficiente de la madera para leña, también es necesaria una incrementada producción y eficiencia en la operación de la explotación forestal. Se encuentran posibilidades adicionales en la administración más eficiente de los recursos de madera existentes, en la introducción de especies de alto rendimiento, el estímulo de bosques y plantaciones energéticas aldeanas, y en el procesamiento de los desechos de la madera. También pueden buscarse mejoras en los métodos tradicionales de la manufactura del carbón de leña, que por lo general desgastan energía.

Sin embargo, las dimensiones de la crisis de la leña son tales que es improbable que las medidas mencionadas sean suficientes para resolver los problemas a corto plazo. En consecuencia, el énfasis debe hacerse en el desarrollo e introducción de combustibles alternativos, ya sea como una medida temporal o como reemplazo permanente de los suministros agotados. Las posibilidades van desde la introducción de combustibles convencionales como el carbón, hasta los combustibles basados en la biomasa tales como el carbón de leña, el etanol, el metanol y el biogas, hasta la conversión directa de la energía solar en calor.

² Ernst, E., 1977, *Fuel Consumption among Rural Families in Upper Volta*, Peace Corps, Ouagadougou, Alto Volta (Africa Occidental).

³ Bailey, J., 1979, *Firewood Use in a Sri Lankan Village: A Preliminary Survey*, University of Edinburgh, Inglaterra.

⁴ Bangladesh Energy Study, 1976, UNDP project BDG/73/038/6/01/45.

⁵ Weatherly y Arnold, citados por el Ad Hoc Expert Group on Rural Energy, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Recursos Energéticos Nuevos y Renovables, 1981, Nairobi, Kenia.

Manufactura del carbón de leña.

El carbón de leña se produce, bajo circunstancias controladas, como resultado de la reducción química del material orgánico. Aunque las técnicas difieren ampliamente, el principio básico es común a todos los procesos de manufactura. Se utilizan tres tipos de instrumentos:

- Hornos, en los cuales la combustión parcial de parte de la carga se utiliza para iniciar la carga de carbonización;
- Retortas, en las cuales la carga se calienta por medio de una fuente externa de calor aplicada al exterior del receptor;
- Hornos continuos, a través de los cuales la carga se introduce mecánicamente.

El proceso de carbonización puede dividirse en cuatro etapas:

- Combustión (tan sólo hornos): parte de la carga se quema en presencia de mucho oxígeno. Esto crea una "zona de encendido" en la que una pequeña fracción de la carga alcanza una temperatura de aproximadamente 600° centígrados; después se reduce el suministro de aire, pero el calor para el siguiente paso se sigue generando en la zona de encendido;
- Deshidratación: en esta etapa se elimina el agua libre contenida en el cuerpo principal de la carga. La temperatura promedio aumenta gradualmente hasta cerca de 270° centígrados;
- Descomposición: una vez que el agua se evaporó, comienza una reacción de carbonización exotérmica en el principal cuerpo de la carga. Esto se logra mediante un rápido aumento de la temperatura hasta alrededor de 600 a 700° centígrados. Los productos del destilado (sobre todo metanol ácido acético y alquitranes) son eliminados al final de la etapa de descomposición, que se indica por un cambio en el color y la cantidad de humo. Debe cerrarse el horno;
- Enfriamiento: la rapidez del enfriamiento depende del grosor y de la capacidad de radiación de las paredes del aparato.

La producción de carbón de leña depende, sobre todo, del equipo utilizado, pero también son importantes otras variables. Por ejemplo, la madera seca (de 20 a 30 por ciento en contenido de humedad) produce rendimientos mayores que la madera mojada (arriba de 60 por ciento de humedad) y la carbonización lenta a bajas temperaturas tiende a producir rendimientos superiores que la carbonización rápida a alta temperatura. El Cuadro 1 muestra los rendimientos y eficiencias típicos obtenidos con diferentes procesos de manufactura.

En general las maderas dura, suave y la procedente de las palmas pueden convertirse en carbón, pero la madera dura tiende a producir un carbón más resistente que la suave. La resistencia del carbón de leña es importante cuando se toma en cuenta el desgaste abrasivo que tiene lugar durante el transporte.

Manufactura de etanol^{6/7}.

El etanol se produce mediante la conversión anaeróbica del azúcar por los microorganismos. La materia prima puede seleccionarse entre las varias plantas que producen azúcar de manera directa o de aquéllas que producen almidón y celulosa. El procesamiento inicial puede diferir considerablemente, pero algunas características son universales:

- los azúcares simples deben extraerse de plantas que la producen directamente;
- el almidón debe hidrolizarse desde sus formas básicas mediante la acción de las enzimas;
- la celulosa, como el almidón, puede hidrolizarse por ácidos minerales o enzimas, pero las diferencias en su estructura química dificultan esto;
- se han llevado a cabo muchas investigaciones sobre la hidrólisis de madera en azúcares, usando ácidos minerales. El objetivo del proceso es maximizar la producción de glucosa y obtener lignina como producto secundario. No obstante, la resistencia del complejo lignocelulósico en la madera requiere del uso de temperaturas elevadas y concentraciones de ácido que ocasionan la descomposición del azúcar. Así, el proceso debe interrumpirse cuando la producción de azúcar haya llegado a su máximo, que es el 50 por ciento del peso de la celulosa.

Cuadro 1. Procesos del carbón de leña

Tipo de aparato	Producción de carbón de leña ton/año (GJ/año)	Valor térmico del carbón de leña (GJ/año)	Efic. de conversión peso en vacío (%)	Eficiencia de conversión técnica (%)
Horno de arcilla ^{1/2}	12 (310)	25.5	10-20	13-27
Horno Mark V ³	72 (1950)	27	25	35
Horno de pendiente ⁴	100 (2400)	24	30	38
Horno de panal	200 (4800)	24	30	38
Horno de Missouri ⁵	310 (9300)	30	35	39
Retorta de Lambiotte	9000 (27000)	30	30	48

* Suposición: madera seca: 19 GJ/ton.

¹ Earl, D. E., *A Report on Charcoal*, FAO, Roma.

² Meta Systems, Inc., 1980, *Potencial of Fuelwood and Charcoal in the Energy Systems of Developing Countries*, US Department of Agriculture, Forest Service, Contract No. 53-319R-0-137

³ Earl, D. E., *op. cit.*

⁴ Meta Systems, Inc., 1980, *op. cit.*

⁵ Earl, D. E., *op. cit.*

⁶ SERI, 1980, *Fuel from Farms, A Guide to Small-scale Ethanol Production*.

⁷ Coombs, J., 1980, *Ethanol - The Process and the Technology for the Production of Liquid Transport Fuels*, Energy from Biomass Symposium, Session III/k2, Brighton, Inglaterra.

Las soluciones de azúcar se fermentan fácilmente en etanol, con suficiencias energéticas de 85-90 por ciento. Después de completar la fermentación, la masa se destila para obtener alcohol (de 96° Gay Lussac) como producto final. La producción de etanol de diferente materia prima se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Producción de etanol

	Producción de biomasa (t/ha/año) ^{1/2}	Producción de etanol (t/ha/año)
Papa	27.0	2.6
Trigo	4.5	1.6
Maíz	5.6	1.7
Mandioca	15.0	2.2
Remolacha	45.0	3.5
Caña de azúcar	55.0	3.1
Madera	12.0	2.5

¹ Bergardt, W., 1980, *Fuels from Biomass - Future Automotive Fuels*, Energy from Biomass Symposium, Session VII/kl, Brighton, Inglaterra.

² Harris, G. S., 1980, *Planning for Transport Fuels from Biomass: The New Zealand Experience*, Energy from Biomass Symposium, Session VII/k3, Brighton, Inglaterra.

Una preocupación importante en la producción del etanol es la Proporción Neta de Energía (PNE) o la producción final de energía en productos útiles, dividida por el total de los insumos energéticos. En la literatura especializada, tienen lugar amplias variaciones en los valores citados para la PNE. Estas diferencias se deben al enfoque tomado; en especial si a todos los insumos y productos se les asigna un valor de equivalencia energética, o si los insumos totales de la energía se comparan sólo con la producción de etanol, o si los insumos energéticos se les asignan a los diferentes productos finales.

Es obvio, sin embargo, que una ganancia energética neta tendrá lugar en aquellos casos en donde la fermentación y la destilación se realizan mediante el quemado de los desechos de los cultivos, como sucede en el caso de la caña de azúcar en donde la PNE reportada varía de 2.4 a un poco más de 7. En el caso de la mayoría de los cultivos de algodón y betabel, el valor se acerca a 1 ó es inferior a esta cifra. Se encuentran valores muy bajos de la PNE en la fermentación de celulosa que usa las técnicas de hidrólisis existentes. Además del rendimiento energético neto, los planificadores de la energía deben prestarle atención a la competencia que puede surgir entre el uso de la tierra para la energía o para los alimentos.

Las estimaciones de los costos varían mucho. El Panel Técnico sobre la Biomasa de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Recursos Energéticos Nuevos y Renovables⁸ encontró una variación de 8-37 dólares GJ.

⁸ Technical Panel on Biomass Energy, 1981, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Recursos Energéticos Nuevos y Renovables, Nairobi, Kenia.

No obstante, un estudio de 1979⁹ calculó el precio del etanol derivado de la caña de azúcar y la mandioca en Brasil, en 9.03 dólares/GJ y 9.39/GJ, respectivamente. En la actualidad, la capacidad promedio por unidad en Brasil es de 19 000 metros cúbicos al año; las unidades recientemente planificadas tienen una capacidad de producción anual de 34 000 metros cúbicos al año.¹⁰

Producción de metanol.

El metanol se produjo originalmente a escala limitada como un producto secundario de la manufactura del carbón de leña. En la década de los veinte, se creó un proceso para producir metanol pasando una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono (gas de síntesis) sobre un catalizador a altas temperatura y presión. Este gas de síntesis puede producirse mediante la reacción del vapor con coque o gasificando el carbón o la biomasa con oxígeno. En la actualidad, la producción de metanol a partir del gas natural es con mucho el método más económico.

El Panel Técnico sobre la Biomasa¹¹ calculó en 13-24 dólares/GJ los costos del metanol a partir de la biomasa. Harris¹² enumera los costos de producción en 1979 en Nueva Zelanda para instalaciones que producen 393 000 toneladas al año y 31 500 toneladas al año en 10.8 dólares/GJ y 11.6 dólares/GJ, respectivamente.

Puede considerarse que la eficiencia de conversión térmica del proceso es de 50 por ciento. Si el metanol se usa para la cocción, esto significa que se necesita una superficie de 0.027 hectáreas de madera por persona, suponiendo una eficiencia de cocción de la estufa de 30 por ciento y una capacidad de producción de 12 toneladas secas, listas para el horno, por hectárea al año. La instalación mínima productora de metanol que puede preverse económicamente tiene un insumo de madera de 200 toneladas por día (95 toneladas metanol/día). Esto significa que la plantación de madera para mantenerla en funcionamiento tiene una superficie mínima de cerca de 55 kilómetros cuadrados.

Biometanación

La biometanación, o digestión anaeróbica, es un proceso que produce energía (sobre todo metano) a partir de biomasa húmeda. La conversión de la materia orgánica compleja consta de tres pasos sucesivos:¹³

⁹ Anón, 1979, *The Brazilian Alcohol Programme*, Int. Mol. Rep., Special Edition, F. O. Licht, Alemania.

¹⁰ Trinidad, S. C., 1980, *Energy Crops- The Case of Brazil*, Energy from Biomass Symposium, Session I/k2, Brighton, Inglaterra.

¹¹ Technical Panel on Biomass Energy, *op. cit*

¹² Harris, G. S., *op. cit*.

¹³ Lettinga, G., 1980, *Anaerobic Digestion for Energy Saving and Production*, Energy from Biomass Symposium, Session III/k2, Brighton, Inglaterra.

- hidrólisis: los polímeros orgánicos se hidrolizan a sus monómeros individuales mediante el efecto de las enzimas;
- formación de ácido: los compuestos hidrolizados se convierten por un grupo de bacterias "formadoras de ácido" en compuestos simples, tales como ácidos grasos volátiles, amoníaco, dióxido de carbono e hidrógeno;
- fermentación del metano: los compuestos simples del paso anterior son convertidos en metano y dióxido de carbono por un grupo de bacterias estrictamente anaeróbicas. Tan sólo un número muy limitado de compuestos, dióxido de carbono, hidrógeno, ácido acético y metanol pueden usarse directamente por las bacterias del metano. La formación de ácidos volátiles y alcoholes superiores necesita la ayuda de un grupo de bacterias acetogénicas.

Es un digestor bien balanceado, los tres pasos anteriores tienen lugar en forma simultánea. Pero las reacciones biológicas son muy sensibles a los choques, tales como las rápidas fluctuaciones de la temperatura, nivel de acidez y tasa de alimentación de la materia prima,¹⁴ y en consecuencia son más difíciles de operar, en una base constante, que las reacciones químicas. Esto le dificulta al agricultor obtener un suministro constante de combustible de su unidad de biogas, ya que está sujeto a todos los cambios de la temperatura y a la falta de uniformidad de la materia de alimentación.

Los requisitos previos para la aplicación exitosa del biogas incluyen un clima tropical húmedo, una alta presión sobre el uso de la tierra y los recursos, un cuidado concentrado de los animales y una tradición del uso del estiércol y del excremento como fertilizante. Es significativo que la justificación primaria para la introducción del biogas en China haya sido la producción de fertilizantes y la disposición sanitaria de los desechos humanos y animales, mientras que la energía se considera como algo opcional (véase el Capítulo 1).

En la práctica, el gas producido consta de 55 a 60 por ciento de metano, de 40-45 por ciento de bióxido de carbón y cantidades menores de hidrógeno, nitrógeno, sulfuros orgánicos e hidrocarburos superiores. El valor promedio térmico del gas es de aproximadamente 20 MJ/metro cúbico. El proceso puede operar con casi cualquier tipo de desecho orgánico con un bajo contenido de liguocelulosa. Por lo general, el contenido total de los sólidos en el digestor se mantiene bajo el 10 por ciento. Una ventaja importante del proceso, es la retención del valor de los fertilizantes en los desechos, aunque aproximadamente 10 por ciento del nitrógeno se pierde y así la pasta aguada se seca. Parece que existe un acuerdo generalizado en el sentido de que, fuera de China, la digestión de biomasa se aplica sobre todo a escala comunal.

Los cálculos de los costos del biogas difieren muchísimo. El Panel sobre la Biomasa¹⁵ proporciona cifras que van de 1.70 a 18 dólares 1980/GJ para unidades de pequeña escala y de 2.20 y 12.50 dólares 1980/GJ para las

¹⁴ Bene, J. G., Beall, H. W., Marshall, H. B., 1979 *Technologies for Converting Biomass into Energy: A Survey*, International Development Research Center, Ottawa, Canadá.

¹⁵ Technical Panel on Biomass Energy, *op. cit.*

unidades más grandes. Ya que estos valores fueron calculados para Estados Unidos y Nueva Zelanda, parecen tener poca importancia para los países en desarrollo. Parikh y Parikh¹⁶ citan costos en la India que varían entre 1.21 dólares 1980/GJ¹⁷ y 2.33 dólares 1980/GJ¹⁸ para una planta de propiedad privada (1.8 metros cúbicos al día) y una planta a nivel de aldea (170 metros cúbicos al día), respectivamente.

Cocción solar.

La energía solar aparece en forma de radiación electromagnética con longitudes de onda que varían entre 0.22 y 10 micrones. Debe distinguirse entre radiación de haz y radiación difusa; la primera alcanza la superficie receptora en línea directa desde el sol, mientras que la segunda se refleja en la atmósfera, en las nubes y en las partículas de polvo. La cantidad de la radiación, así como la división entre radiación de haz y difusa, es extremadamente variable, pues depende de factores tales como la ubicación geográfica, la hora del día, la estación, las condiciones meteorológicas, y la altitud. En la práctica, en la mejor de las circunstancias, la radiación total (de haz y difusa) rara vez sobrepasará los mil W/metro cuadrado. La cifra de 200 W/metro cuadrado (6.3 GJ/metro cuadrado/año) puede tomarse como un valor medio representativo a lo largo de 24 horas.

En principio, existen dos tipos de equipo para la conversión de energía solar en calor. Estos son los recolectores planos no direccionales, que convierten el total de la radiación solar disponible, y los colectores direccionales, que convierten sólo la radiación de haz. Los recolectores planos (gas evacuado) pueden alcanzar temperaturas de hasta 150° centígrados, lo

Cuadro 3. Calentadores solares

Tipo	Eficiencia (%) 1980 \$/m ²	Costos ¹ m ² cap.	Superficie \$cap.	Costo Calentador	\$/GJ
Colector plano	20	150	1.4	210	78
Colector direc- Cional	50	200	0.55	110	41

Nota: Las estimaciones de arriba se basan en los siguientes supuestos:
 -radiación solar incidente durante tiempo de cocción: 500W/m²
 -periodo diario de cocción: 4 horas
 -interés: 10 por ciento
 -depreciación: 5 años

¹ Technical Panel on Solar Energy, 1981, UN Conference on New and Renewable Sources of Energy, Nairobi, Kenia.

¹⁶ Parikh, J. K. y Parikh, K. S., 1977, "Mobilization and Impacts of Biogas Technologies", *Energy*, 2, pp. 441-455.

¹⁷ Dólares 0.91 1976/GJ y dólares 1.75 1976/GJ.

¹⁸ Dólares 0.91 1976/GJ y dólares 1.75 1976/GJ.

Cuadro 4. Comparación de tecnologías de cocción

Combustible	Valor térmico (MJ/kg)	Eficiencia de conversión térmica (%)	Costo del combustible (\$/GJ)	Costo efectivo de la energía (\$/GJ)	Total uso de madera (kg/MJ)	Costo del transporte (\$/GJ.km)
Madera Tradicional	15	9	1-4	11-44**	0.58	0.067
Madera Mejorada		20		5-20**	0.26	
Carbón de leña Tradicional	28	20	3-15	15-75**	1.66+	0.036
Carbón de leña Mejorado		30		10-50**	1.11+	
Carbón	30	30	4.3	14.3**	-	0.033
Querosén Tradicional	42	30	6.2	18-21**	-	0.024
Querosén Mejorado		35				
Etanol	27	30	9.0*	30**	0.59	0.037
Metanol	20	30	11.0	37**	0.35	0.05
Biogas (MJ/m ³)	20	60	2.35	3.9**	-	-
Calentador Solar (plano)	-	20	-	78	-	-
Calentador Solar (*direccional)	-	50	-	41	-	-

Notas: * Caña de azúcar, Brasil.

** Costo de la estufa no incluido

+ Eficiencia térmica de los hornos de carbón de leña: tradicional 20 por ciento, mejorada 40 por ciento.

++ Calculado sobre la base de 1 tonelada/km.

La cantidad de agua necesaria para la irrigación varía con factores tales como tipo de suelo, cultivo, clima y métodos de irrigación, pero 50-100 metros cúbicos/hectárea/día es una estimación razonable en la mayoría de las circunstancias.¹⁹ Si se supone una irrigación diaria de 10 horas, las necesidades energéticas para diferentes cabezas de ganado y cantidades variables de agua pueden calcularse fácilmente. Algunos ejemplos se muestran en el Cuadro 5.

La necesidad energética para el trillado se mide mejor en relación con el peso de los cereales procesados. Un estudio ITB en Bandung²⁰ calculó una energía al eje de cerca de 1 GJ/tonelada en el caso de los molinos arroceros. La energía instalada varió de 10-150 kW. A fin de juzgar la aplicabilidad de diferentes selecciones energéticas, es necesario conocer los requerimientos promedio instalados de las actividades industriales rurales típicas. El Cuadro 6,

¹⁹ NAS, 1974, *More Water for Arid Lands*, Washington, D. C.

²⁰ ITB, 1979, *Prefeasability Study on Gasification*, Bandung, Indonesia.

tomado de un estudio hindú en Andhra Pradesh,²¹ proporciona esta información para diferentes tipos de industrias rurales.

Las necesidades energéticas para el transporte se miden mejor en toneladas/kilómetro. La energía al eje requerida depende de las condiciones del camino y el vehículo, así como el tamaño y tipo de éste y el método de operación. Puede suponerse que las necesidades efectivas de energía al eje para el transporte camionero alcanzan un promedio de 1.6MJ/tonelada/kilómetro,²² mientras que en el transporte ferroviario desciende a 0.5 MJ/tonelada/kilómetro.²³ La mayor parte del transporte rural en los países en desarrollo es de pequeña escala y cortas distancias. Es probable que los vehículos tirados por animales sean económicos para cargas hasta de dos toneladas y distancias de hasta cuarenta kilómetros. En especial, en operaciones que requieren largos periodos de carga y descarga y niveles de utilización relativamente bajos (50-100 días/año), parecen preferibles a los camiones, que necesitan una carga de 50 toneladas, largas distancias y un alto nivel de utilización (250-300 días/año) a fin de ser económicos.

Fuentes de energía.

En la actualidad, los motores diesel satisfacen, por lo general, las necesidades energéticas mecánicas rurales de 3kW y más. Los motores a gasolina y la tracción animal satisfacen las necesidades energéticas menores.

Cuadro 5. Necesidades energéticas para la irrigación

Cabeza (m)	50m ³ /ha/día	100m ³ /ha/día
5	0.11 kW/ha	0.23 kW/ha
10	0.23	0.45
15	0.34	0.68
Nota: Basado en B =	9.8	x
	3600	n

en donde B = energía instalada en bombas *Kw(
G = flujo volumétrico acuático *m³/ha
h profundidad del pozo (me-tros)
n = eficiencia de la bomba. Se supone un 60%

²¹ SIETI, 1977, *Impact of Electrification on Rural Industrial Development: A Study in Andhra Pradesh and a Study in Kurnout District of Andhra Pradesh*, Hyderabad, India.

²² US Government, 1975, *Energy Alternatives: A Comparative Analysis*.

²³ FEA, 1976, *Comparison of Energy Consumption*.

Cuadro 6. Energía al eje efectiva promedio de las pequeñas industrias por tipo

Tipo de industria	Energía al eje efectiva (promedio) (k W)
Molinos de arroz	14.0
Molinos de trigo	7.0
Molinos de aceite	16.0
Descascaradoras de cacahuates	14.0
Despepitadoras de algodón	35.0
Madererías	10.0
Telares eléctricos	2.2

Ya existe una amplia gama de posibilidades para la sustitución de alternativas o mejoras en los métodos disponibles para suministrar energía y cada vez se avanza más.

Energía de tracción animal.

La energía que puede generar un animal de tiro depende de numerosos factores, incluyendo su especie, peso corporal, estado de salud y nutrición, su entrenamiento y manejo y su ambiente de trabajo. La FAO calcula,²⁴ dada una producción promedio sostenida de animales de tiro, tales como bueyes y búfalos, una energía de 0.3-0.6 kW. Esto significa que, para fines prácticos, la "capacidad energética instalada" asciende más o menos a 1 kW (un par de bueyes). La eficiencia del uso de la energía de animales de tiro con frecuencia es muy baja, como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Artefactos tradicionales de levantamiento del agua

Tipo	Fuente energética	Profundidad máxima del agua	Eficiencia
Dalou	1 buey	50m	45%
Rueda persa	2 bueyes	10 m	50%

²⁴ FAO, 1976, *Farm implements for Arid Tropical Regions*, Roma.

La forma más rápida de mejorar la eficiencia es usar equipo ligero moderno de baja fricción y un arnés adecuado. El mejoramiento de la fuerza motriz es una actividad a largo plazo.

Es difícil calcular los costos de la energía animal. A partir de la información recolectada por Odend'hal,²⁵ la eficiencia total de un buey puede calcularse en más o menos un 10 por ciento. Si todo el insumo energético al animal se proporciona en forma de cereales -cosa que rara vez sucede- necesitará alrededor de 6.7 kg/día. Si se considera que el costo del cereal es de 0.15 dólares/kg, los costos de operación ascenderían a 1.00 dólares/día o 100 dólares/GJ.

Energía eólica.

Los pequeños molinos de viento son una forma tradicional de tecnología energética en muchas partes del mundo y se usan para bombear agua y en otras aplicaciones donde pueden tolerarse producciones irregulares. En los últimos años se han creado diversos diseños de bajo costo, adecuados para su fabricación en muchos países en desarrollo. Su introducción en gran escala se ha visto obstaculizada por problemas de confiabilidad, pero éstos están recibiendo una gran atención y se están resolviendo poco a poco.

La producción energética de los molinos de viento depende de la velocidad promedio del viento y del tamaño y la eficiencia del molino. Puesto que es difícil prever molinos localmente producidos con diámetros de rotor de más de 5 metros, la energía máxima instalada puede calcularse en 160W tomando en cuenta una velocidad promedio del viento 4 de metros/segundo y una eficiencia de 20 por ciento. Por lo general, se está de acuerdo en que la energía eólica es impracticable en el caso de velocidades promedio de menos de 3 metros/segundo. Debido a su dependencia en el régimen de los vientos, es difícil generalizar los costos de la energía eólica. El Panel de energía Eólica de la Conferencia de las Naciones Unidas²⁶ calculó que la energía al eje de los pequeños molinos de viento costaría 50-125 dólares/GJ.

Energía mecánica y eléctrica solar.

La radiación solar puede convertirse en energía mecánica usando un ciclo termodinámico con una fuente cálida proporcionada por colectores solares, y una fuente fría proporcionada normalmente por el agua de un pozo. En los países subdesarrollados se han instalado varios sistemas de bombeo de agua basados en colectores planos de baja temperatura pero, debido a su baja eficiencia, no han probado su efectividad, desde el punto de vista de sus costos. Se están haciendo experimentos con sistemas pequeños más eficientes basados en reflectores direccionales o lentes de Fresnel. No

²⁵ Odend'hal, S., 1972, "*Energetics of Indian Cattle in their Environment*", Human Ecology, 1.

²⁶ Technical Panel on Wind Energy, 1981, UN Conference on New and Renewable Sources of Energy, Nairobi, Kenia.

obstante, en las circunstancias rurales prácticas, la necesidad de orientar los colectores al sol probablemente limitará seriamente su utilización.

Las células solares, usualmente en forma de películas u obleas delgadas, son artefactos semiconductores que convierten del 5 al 15 por ciento de la radiación solar incidente en electricidad de corriente directa. Su eficiencia depende de la intensidad de espectro de iluminación, el diseño de la célula solar, el material semiconductor y la temperatura. Una célula solar funciona de manera muy semejante a la de una batería de voltaje muy bajo (más o menos 0.5V), que se recarga constantemente a una tasa proporcional a la radiación incidente.

La extraordinaria simplicidad de las células fotovoltaicas las convierte en un sistema energético altamente deseable tanto para los países en desarrollo como para los desarrollados. Sus características atractivas son la falta de partes móviles, una degradación muy lenta de células adecuadamente hermetizadas, la extrema sencillez de su uso y la posibilidad de usar sistemas modulares, desde unos cuantos vatios hasta la gama de los megavatios.

Debido a su modularidad, los sistemas de células solares muestran muy pequeñas economías de escala. Pero debido a que sus costos de combustible son nulos y los costos de mantenimiento y reparación pequeños, el costo de la energía fotovoltaica es muy sensible a los valores seleccionados para el interés y la vida útil. El Banco Mundial²⁷ calcula en la actualidad que el costo de la energía procedente de pequeños sistemas de energía solar, incluyendo el almacenamiento en baterías, es de 275-835 dólares/GJ, basado en costos de inversión en el sistema de 20,000-30,000 dólares/kW pico. Se prevén grandes reducciones de 8,000-10,000 dólares/kW pico en dos o tres años, pero conforme desciende el costo de las células solares, es probable que los costos totales se vean dominados por los costos de "equilibrio del sistema". Estos incluyen el costo del almacenamiento, en donde su aplicación tiene un potencial inherente.

Motores de combustión externa.

Debido a que el tamaño económico de las máquinas de vapor por lo general es muy grande para las necesidades de la energía rural, nos limitaremos a examinar los motores Stirling. Estos son motores de calor de combustión externa que utilizan aire u otros gases como fluidos propulsores. Son capaces de utilizar cualquier forma energética, tal como la madera, los desechos agrícolas, el carbón o la energía térmica solar.

Inventados por Robert Stirling en 1816, compitieron con las máquinas de vapor de su tiempo, y a principios de 1900 se vendieron miles de estas máquinas como bombas de agua operadas por carbón y que producían de 50 a 500 W de energía útil con una eficiencia general de más o menos un 2 por ciento. Los grandes motores de cigüeñal Stirling -en especial para usos automotrices- siguen presentando diversos y difíciles problemas de diseño pendientes de

²⁷ Banco Mundial, 1980, *Energy in Developing Countries*, Washington, D. C.

resolver, pero los motores de pistón libre y movimiento lineal evitan muchos de estos problemas. La energía se extrae de estos motores por medio de bombas de movimiento lineal o alternadores. La información actual sobre la tecnología del motor Stirling indica posibles eficiencias térmicas generales de 17.5 por ciento (caldera 50 por ciento, motor 35 por ciento).

Aunque aún no existe una importante fabricación comercial de motores Stirling y, en consecuencia, existe cierta incertidumbre técnica y económica, las estimaciones tentativas²⁸ muestran que dichos motores pronto podrían competir con los motores de gasolina o de gasificación del mismo combustible en la pequeña gama energética de menos de 2kW.

Gasificación.

La conversión completa de combustibles sólidos en gas combustible es un proceso bien conocido que se ha usado con éxito para proporcionarle combustible a los motores de combustión interna en muchos países durante periodos de escasez de petróleo. Existen varias tecnologías diferentes de la gasificación, tales como el colector fijo, el colector fluido, el colector en tren y el baño fundido. Estos usan diferentes agentes de gasificación, tales como aire, oxígeno o vapor y producen una diversidad de gases de valor térmico bajo a medio.²⁹ Para los fines del presente análisis, el más importante es el gasificador fijo, que usa aire para la combustión parcial del combustible y produce un gas de bajo valor térmico. Pueden distinguirse dos tipos de gasificadores fijos.

Los gasificadores de corriente paralela o descendente producen un gas limpio de bajo valor térmico (45-50 MJ/metro cúbico) -llamado a veces gas productor- que puede usarse directamente en los motores de combustión interna. La eficiencia del proceso varía entre 60 y 80 por ciento.

Los sistemas actuales están limitados a una producción máxima de más o menos 200 kW (mec.). Pueden usar biomasa, siempre que ésta tenga un contenido de humedad relativamente bajo -menos del 25 por ciento- y un contenido de cenizas de menos del 6 por ciento. Entre los combustibles se encuentran trozos y bloques de madera, aserrín granulado, mazorcas de maíz, cáscaras de coco, corazones de palmero, diferentes tipos de huesos de frutas y otros. La cáscara del maíz y la paja no son adecuados debido a su alto contenido de ceniza.

Los gasificadores pequeños de corriente descendente pueden fabricarse localmente en muchos países en desarrollo. Los costos de inversión varían de 250 dólares/kW (mec.) para los modelos importados a 125 dólares/kW (mec.)

²⁸ Meta Systems, Inc., 1980, *op. cit.*

²⁹ Swaaij, W. P. M. 1980 *Gasification - The Process and the Technology Energy from Biomass Symposium, Session IV/kl, Brighton, Inglaterra.*

por los fabricados en la localidad.³⁰ Unos cuantos fabricantes ofrecen gasificadores de corriente paralela en la gama de 15 a 200 kW.

Los gasificadores de contracorriente o de corriente ascendente producen gas de valor térmico mediano (55-60 MJ/metro cúbico), el cual sólo puede usarse como combustible para motores después de un cuidadoso limpiado. Debido a que el costo del equipo de limpiado es elevado, por lo general se diseñan sistemas con una producción superior a los 100 kW (mcc.). Los gasificadores de contracorriente pueden utilizar todo tipo de combustible de biomasa (incluyendo el remanente del arroz) con un contenido de humedad menor a 40-45 por ciento. Un interés renovado en los gasificadores de contracorriente ha llevado a su comercialización. Los costos de inversión son de alrededor de 300 dólares/kW (mcc.).

Motores de combustión interna.

El etanol puede mezclarse hasta en un 20 por ciento con la gasolina y usarse sin cambio alguno en los actuales motores de encendido por bujías. Para utilizar el etanol al 100 por ciento, se requieren cambios en los motores. Estos implican un carburador modificado, un múltiple de entrada calentado, un tanque y un sistema de distribución resistente a la corrosión, un sistema de encendido modificado y un cabezal también modificado. Deben diseñarse motores especiales a fin de utilizar un 100 por ciento de etanol como combustible.

La principal desventaja del etanol es su inferior valor térmico comparado con la gasolina (22 MJ/kilogramo comparado con 32 MJ/kilogramo). No obstante, esta desventaja se ve parcialmente equilibrada por una superior eficiencia térmica (hasta del 30 por ciento en comparación con el 22 por ciento).

En los motores diesel, los requerimientos de combustible están ampliamente dictados por la calidad del encendido del combustible. El etanol puede utilizarse hasta en un 7 por ciento como complemento del combustible diesel sin modificar el motor. En el caso de mayores cantidades de etanol, es necesario añadirle aditivos al combustible o realizar complicadas modificaciones del motor.

Las mismas observaciones valen para el metanol, con la excepción de que, debido a su inferior valor térmico, la producción energética por unidad de volumen es aún más baja que en el caso del etanol.

Los motores de encendido por bujía pueden funcionar con el gas productor. Debido al bajo valor térmico de éste, la producción energética máxima se ve reducida en un 30 a 50 por ciento, según las características del motor y las velocidades promedio de los pistones. Los motores diesel, sin modificaciones, tan sólo pueden operarse con gas productor según el modo de "combustible

³⁰ Stassen, H. E. M. y Zijp, T., 1980, *The Gasification by Partial Combustion Project in Tanzania, Progress Report*, Small Industries Development Organization (Arusha, Tanzania) y University of Twente (Enschede, Holanda).

dual", y se requiere aproximadamente 20 por ciento del combustible diesel normal para asegurar el encendido. Por lo común, la reducción de la producción energética máxima del motor se limita a alrededor del 15 al 20 por ciento.³¹

Los motores de gasolina pueden tolerar un amplio campo de proporciones de metano-dióxido de carbono, por lo que pueden operar con biogas. La presencia del dióxido de carbono ocasiona una reducción de la producción energética máxima del motor, pero esto puede ser provechoso para la vida del motor.³² Pueden lograrse eficiencias térmicas de hasta un 30 por ciento.

Los motores diesel pueden funcionar con biogas en el modo de "combustible dual". Técnicamente es posible usar mezclas de un 90 por ciento de biogas y 10 por ciento de diesel, pero hasta la fecha tan sólo ha sido posible lograr una mezcla máxima de 2:3 en el largo plazo.³³

Los aceites vegetales, como el de girasol, colza y palma, pueden usarse ya sea puros o mezclados con combustible diesel en estos motores. La productividad energética máxima de motores que usan 100 por ciento de aceite de girasol desciende en más o menos 4 por ciento y el incremento del consumo del combustible es de 5 a 10 por ciento. La aglomeración de los aceites vegetales así como el coquizado de los inyectores de combustible presentan problemas que, quizá, podrían resolverse convirtiendo a los aceites en sus etilésteres.^{34/35}

Conclusiones.

Es difícil hacer observaciones generales acerca de los "nichos" de aplicación de las tecnologías descritas arriba. Entre los factores que influyen en mayor medida en la selección del sistema se encuentran la especificidad del sitio, de los costos del sistema, la madurez técnica y la adaptabilidad local, de la escala de producción del equipo, de las tasas fijas de cargos y cuestiones legales y de jurisdicción, tales como subsidios y otros incentivos legales. No obstante, a fin de proporcionar alguna información sobre las posibilidades de aplicación, pueden hacerse las siguientes observaciones:

- En el rango fraccional de los kW (hasta 1 kW), la energía de arrastres de los animales y la eólica (en especial para bombear agua) parecen las únicas alternativas razonables. Si se realiza el potencial de la reducción de precios de las células fotovoltaicas, probablemente tendrán su primera aplicación en este rango energético.

³¹ Stassen, H. E. M., 1979, *Utilisation of Producer Gas in Small Diesel Engines*, en Beenackers, A. (comp.), *Chemical Technology for Developing Countries*, International Conference of the Nigerian Society of Chemical Engineers, Zaria, Nigeria.

³² Picken, D. J. y Fox, M. F., 1980, *Uses of Biogas for Electric and Mechanical*, Power Generation, Energy from Biomass Symposium, Session VII/14, Brighton, Inglaterra.

³³ Meta Systems, Inc., *op. cit.*

³⁴ Bruwer, J. J., 1980. *Sunflower Oil and Diesel Fuel*, Energy from Biomass Symposium, Session VII/14, Brighton, Inglaterra.

³⁵ Hall, D. O., *Vegetable Oils for Diesel Engines* (en publicación).

- En el pequeño rango de kW (1-3kW), la única alternativa viable actual al motor de gasolina es el biogas. Los pequeños motores Stirling apenas y son comerciales y aún no son económicamente competitivos. Con todo, pronto podrían serlo si siguen aumentando los costos de los combustibles líquidos y si la economía de la producción en grandes números reduce los costos de inversión. Es difícil que los gasificadores sean introducidos en este rango energético debido a los costos fijos relativamente elevados, comparados con los de los pequeños motores de gasolina.

- En el caso del alto rango energético (5 kW y más), los motores diesel de gasificación parecen adecuados, siendo las únicas excepciones los casos en los que los precios del combustible diesel sean extremadamente bajos o el número de horas de operación anual también sea bajo. La aplicación de los gasificadores de corriente descendentes especialmente atractiva en el rango mecánico de 5 a 200 kW. Para mayores necesidades energéticas, los gasificadores ascendentes merecen estudiarse.

- Los combustibles basados en la biomasa, como el etanol, el metanol y los aceites vegetales presentan alternativas técnicamente acertadas a la gasolina y al diesel. Sin embargo, la cuestión del Coeficiente Neto de Energía (con la excepción de la caña de azúcar) así como los costos directos, evita su uso mundial en la actualidad. Con todo, debido a la falta de alternativas competitivas, se prevé alguna penetración en el sector del transporte, en especial en países que se encuentran en posición de producir etanol a partir de la caña de azúcar o la melaza.