

# FOTOSSÍNTESE E ENERGIAS RENOVÁVEIS<sup>1</sup>

Joaquim Francisco de Carvalho\*

## Introdução

Consideram-se renováveis as fontes de energia que são continuamente reconstituídas pela incidência das radiações solares sobre a Terra.

Essas radiações podem ser aproveitadas diretamente, por exemplo, em coletores termo-solares e em conversores fotovoltaicos. Podem também ser aproveitadas indiretamente, mediante a intervenção humana sobre fenômenos naturais por elas provocados, como os ventos, as ondas, o ciclo hidrológico e a reação fotobioquímica de fotossíntese, que está na origem de vegetais como as gramíneas (cana de açúcar, sorgo, capim Napier, etc.); as leguminosas (soja); as euforbiáceas (mamona, mandioca); as palmáceas (babaçu, dendê); as mirtáceas (eucalipto); as pináceas (*pinus*); as ninfeáceas e as pontederiáceas (aguapé, jacinto de água) etc.

A partir dessas plantas, podem ser produzidos combustíveis tais como o etanol, o biodiesel, o metanol, a lenha, o carvão vegetal, os biogases e o hidrogênio.

## A energia solar que banha a Terra

Nos limites extremos da atmosfera terrestre, a energia solar incide sobre uma superfície normal à direção da radiação com uma potência da ordem de  $1,353 \text{ kW/m}^2$  (constante solar).

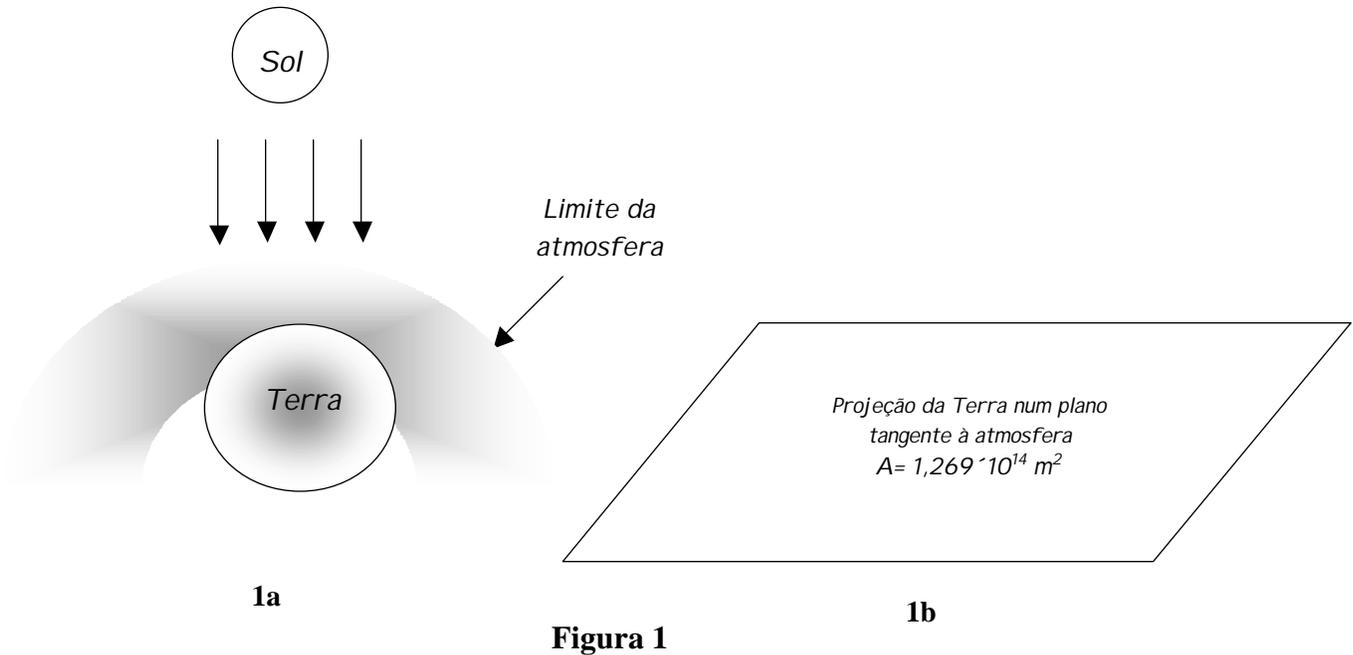
Assim, a quantidade total de energia solar que incide anualmente sobre a Terra é igual ao produto da constante solar, pela área da projeção do globo terrestre sobre um plano normal às radiações (V. figuras **1a** e **1b**), pelo número de horas do ano, ou seja:

---

<sup>1</sup> Palestra apresentada no ciclo “Uma visão contemporânea do conceito de energia e suas aplicações”, promovido pelo CBPF durante a semana Nacional de Ciência e Tecnologia, de 18 a 22 de outubro de 2004

\* Membro do Conselho de Energia da FIRJAN e do Conselho Consultivo do ILUMINA. Diretor Técnico da Lightpar.

$$1,353 \text{ kW/m}^2 \times 1,269 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 8766 \text{ h/ano} = 1,5 \times 10^{18} \text{ kWh/ano.}$$

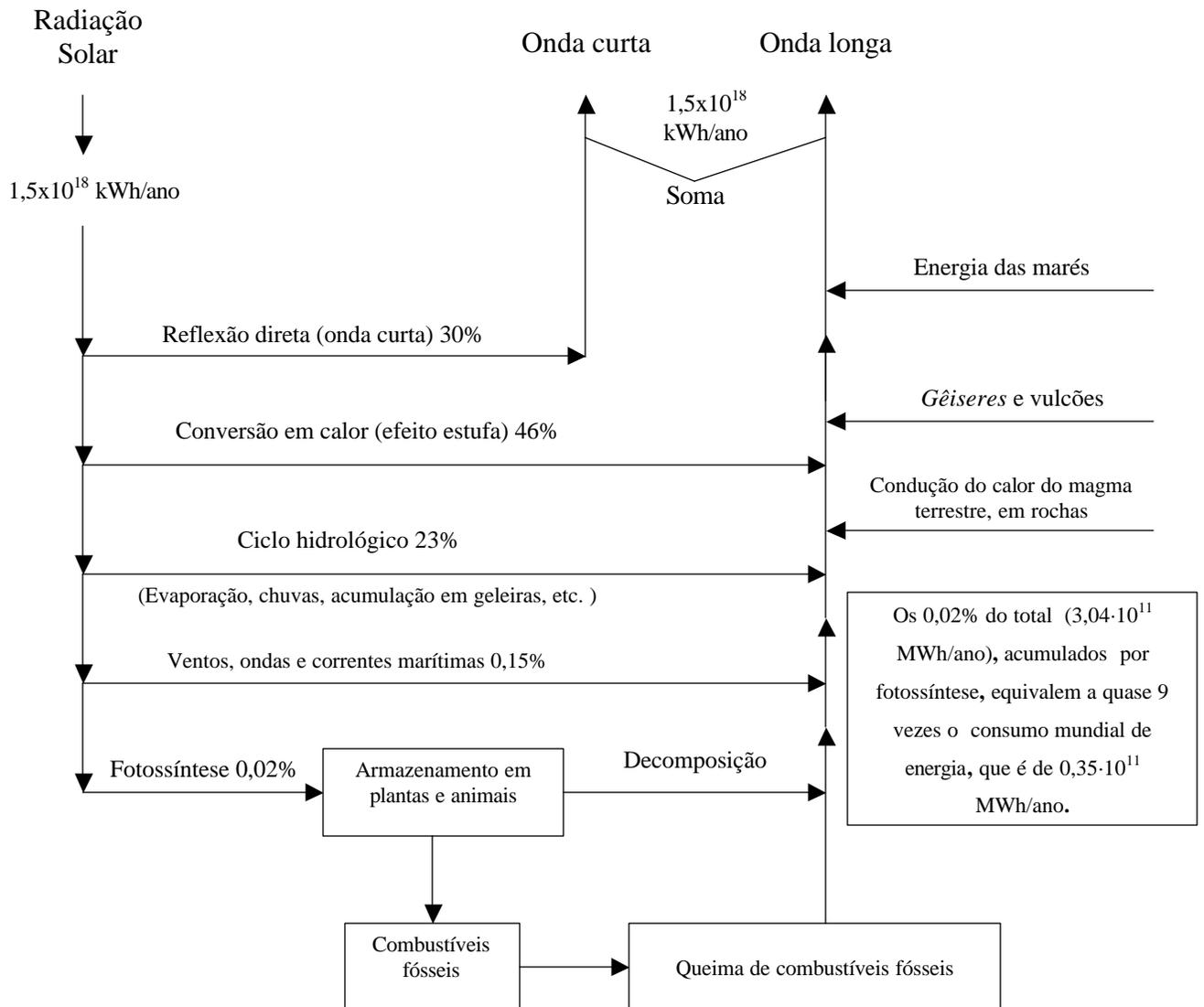


Esta energia apresenta-se sob a forma de radiação eletromagnética, numa larga faixa de comprimentos de onda que vai desde os raios X até as ondas de rádio, embora a parte preponderante concentre-se numa faixa mais estreita, entre o ultravioleta e o infravermelho.

Como indica a figura 2, do total incidente, 30% são refletidos pela camada extrema da atmosfera, sob a forma de radiações de onda curta, que compõem a franja ultravioleta, violeta e azul do espectro. Os 70% restantes têm os seguintes destinos: pouco mais de 46% são absorvidas na atmosfera e na superfície terrestre, degradando-se em calor à temperatura superficial dos continentes e oceanos. A energia degradada é reemitida pela Terra na faixa infravermelha, ou seja, a frequências muito menores do que as das radiações incidentes.

Como alguns gases da atmosfera (gás carbônico, vapor de água, etc.), são semi-opacos às radiações infravermelhas, este fenómeno dá origem ao chamado efeito estufa, que mantém a temperatura média da atmosfera em torno de 15°C, possibilitando, entre outras coisas, a vida humana. No entanto, se a concentração dos referidos gases crescer acima de determinados limites, a temperatura poderá subir a valores deletérios.

Cerca de 23% da energia incidente respondem pelo ciclo hidrológico, ou seja, pela evaporação das águas e pelos fenômenos de convecção, formação de nuvens, precipitações sob forma de chuvas e nevasdas, acumulação em geleiras, lagos e rios, etc., e também acabam reemitidos na faixa térmica. Uma pequena parte da radiação que penetra na biosfera (em torno de 0,15%) responde pela formação das ondas e dos ventos.



**Figura 2**

Por fotossíntese, nas plantas, armazenam-se 0,02% do total, ou seja,  $3,04 \cdot 10^{11}$  MWh/ano, o que equivale a quase 9 vezes o consumo mundial de energia, que é de  $0,35 \cdot 10^{11}$  MWh/ano, somando-se todas as fontes.

A contribuição da energia própria da Terra (vulcões, *gêiseres*, calor do magma, conduzido em rochas, etc.), somada à energia gravitacional (que dá origem às marés), equivale a apenas 0,02% da energia recebida do sol.

Toda a energia solar que chega (ou chegou) à Terra – aí incluído o calor gerado pela decomposição de plantas e animais, cuja formação resultou de energia solar que incidiu há milhões de anos – é reemitida na faixa térmica, juntamente com a energia própria da Terra, de sorte que o total incidente equivale à soma das energias reemitidas, equilibrando o balanço (V. figura 2).

### **Fotossíntese e vida: a conversão da energia luminosa em tecido vegetal.**

O fenômeno da fotossíntese ocorre sob a ação de fótons (luz), na presença de clorofila (plantas verdes) e de compostos tais como o difosfato e o trifosfato de adenosina. (ADP e ATP), que desempenham o papel de transportadores de energia entre os centros de reação fotossintética.

Nas reações fundamentais da fotossíntese, que são de oxi-redução, o agente redutor é a água (H<sub>2</sub>O), que é oxidada a oxigênio (O<sub>2</sub>). O agente oxidante é o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que é reduzido ao nível de carboidrato (CH<sub>2</sub>O). Esta sintetização é endergônica, e a energia que ela consome provém da faixa visível do espectro solar.

Ao cabo de reações extremamente complexas, formam-se os tecidos vegetais, que são constituídos, em última instância, por energia química potencial: celulose, glicídeos, lipídeos, proteínas, lignina, etc. Portanto, a fotossíntese nada mais é que a síntese de carboidratos e outros compostos orgânicos de alto teor energético, a partir de substâncias de baixo potencial energético existentes na atmosfera, como o dióxido de carbono e a água.

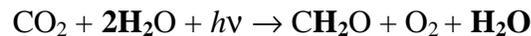
De maneira simplificada, podemos representar a fotossíntese pela seguinte reação, onde  $h\nu$  é a energia dos fótons:



Experimentos realizados com o emprego de técnicas laboratoriais sofisticadas, tais como a ressonância paramagnética eletrônica, a difração de raios-X, a cromatografia e a eletroforese, revelam detalhes importantes dos centros de reação fotossintética e dos mecanismos de transporte de energia e síntese de matéria orgânica.

Entre outros fenômenos, constata-se que, a partir dos carboidratos sintetizados e juntamente com outras substâncias existentes no solo, formam-se todos os compostos orgânicos da planta (proteínas, ácidos, gorduras, pigmentos, etc.) através de reações bioquímicas catalisadas por enzimas, que ocorrem nos referidos centros de reação.

Na reação de fotossíntese são produzidos dois átomos de oxigênio, mas cada molécula de água contém apenas um átomo de oxigênio, de modo que pelo menos duas moléculas de água devem participar. Assim, seria mais apropriado escrever a reação da seguinte forma:



A luz desagrega as moléculas de água, liberando oxigênio e hidrogênio. Os átomos de hidrogênio vão, por um lado, reduzir o  $\text{CO}_2$  em  $\text{CH}_2\text{O}$  e, por outro lado, produzir uma nova molécula de água. Testes feitos com água marcada com o isótopo  $^{18}\text{O}$  do oxigênio ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ) liberaram oxigênio gasoso contendo o isótopo  $^{18}\text{O}$ , e testes feitos com água normal, liberaram o isótopo estável,  $^{16}\text{O}$ . Por conseguinte, o oxigênio liberado na fotossíntese vem da água e não do dióxido de carbono. Isto significa que, ao fotolisar a água, a luz fornece a energia para o trabalho consubstanciado no processo de fotossíntese.

### **Eficiência da fotossíntese**

A eficiência da fotossíntese é a razão entre a energia química armazenada e a energia solar absorvida. A energia armazenada equivale à diferença entre a energia química contida nos compostos orgânicos e no oxigênio gasoso liberado, e aquela contida nos reagentes, ou seja, no dióxido de carbono e na água. Essa diferença pode ser medida em termos da variação da energia livre ( $\Delta G$ ). Para a reação de fotossíntese, que se realiza em condições normais de temperatura e pressão, temos  $\Delta G = 0,47 \text{ MJ/mol}$ , ou seja,  $112 \text{ kcal/mol}$ .

A energia absorvida vem de uma faixa que abrange cerca de 50% do espectro solar completo, com comprimento de onda médio em torno de  $0,68 \mu\text{m}$ , ou  $6,8 \times 10^{-7} \text{ m}$ , compreendendo a luz visível, na região vermelha.

A energia de um fóton é diretamente proporcional à frequência da respectiva radiação, isto é  $E = h\nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck, cujo valor é  $6,63 \times 10^{-34} \text{ joules} \times \text{segundo}$  e  $\nu$  é a frequência da radiação, que é igual a  $c/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o seu comprimento

de onda e  $c$  é a velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Da lei da equivalência fotoquímica, de Einstein, resulta que cada molécula reage ao absorver um fóton (ou *quantum* de luz), de forma que, para reduzir uma molécula-grama (1 *mol*) de  $\text{CO}_2$  e sintetizar 1 *mol* de  $\text{CH}_2\text{O}$ , absorve-se 1 *mol-quantum* de energia, ou seja,  $N \cdot hc$  onde  $N$  é o número de Avogadro ( $N = 6,02 \times 10^{23}$ ). Calculemos essa energia:

$$6,02 \times 10^{23} \times 6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 6,8 \times 10^{-7} = 0,176 \text{ MJ} = 42 \text{ kcal.}$$

Esta energia refere-se à excitação inicial da molécula que absorve o fóton, mas o resultado final, isto é, a quantidade de matéria sintetizada (ou o número de moléculas transformadas, por fóton absorvido) depende da eficiência das reações que se seguem à excitação inicial.

Cada molécula-grama de  $\text{CO}_2$  reduzida (ou molécula-grama de  $\text{O}_2$  liberada) requer 42 kcal, armazenando 112 kcal sob a forma de energia livre na molécula de carboidrato sintetizada. Mas, na realidade, constata-se que, para reduzir cada molécula-grama de  $\text{CO}_2$  e sintetizar uma molécula-grama de  $\text{CH}_2\text{O}$ , são necessários, no mínimo, de 8 *mol-quantum* de luz visível, contendo  $8 \times 42 = 336$  kcal de energia.

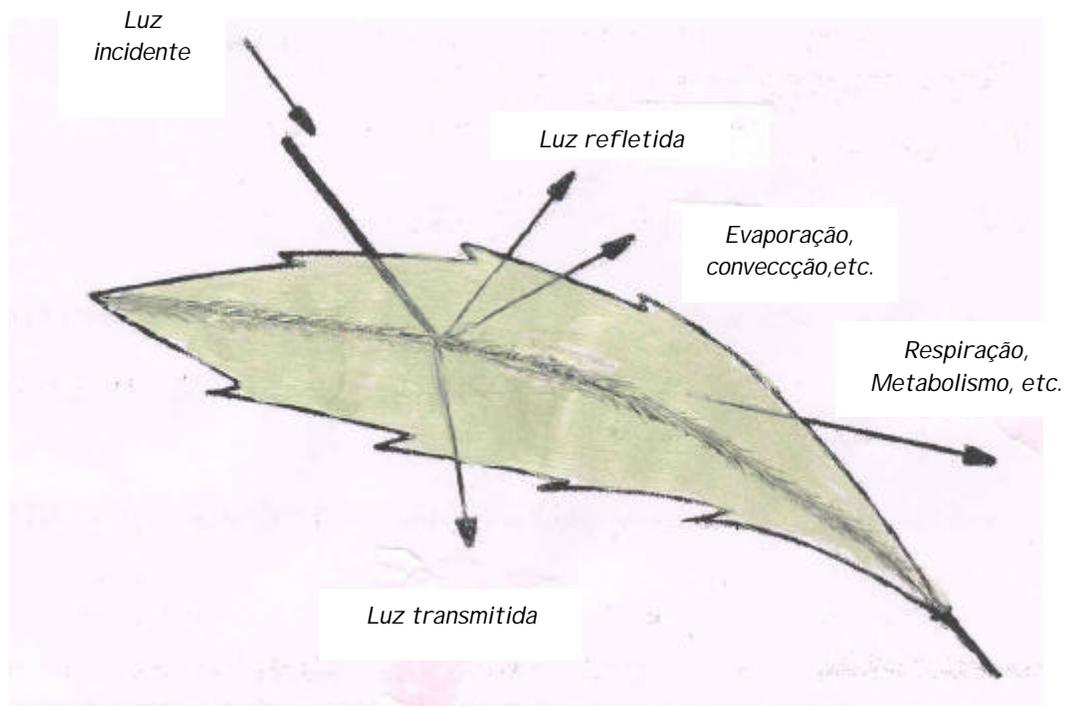
Por outras palavras, uma variação de energia livre de 112 kcal, correspondente à redução de cada molécula-grama de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, para a síntese de  $\text{CH}_2\text{O}$ , absorve 336 kcal de energia solar. Isto significa que, na escala molecular, a eficiência termodinâmica líquida da fotossíntese, no tocante à absorção dos *quanta* de luz, para a redução das moléculas de  $\text{CO}_2$  e armazenamento de energia livre nas moléculas de  $\text{CH}_2\text{O}$ , é de  $112/336 = 0,33$  ou seja, 33%.

A eficiência da fotossíntese é influenciada pelas reações intermediárias que compõem o processo, que se subdivide em duas etapas muito complexas. A primeira, extremamente rápida, é uma fase fotoquímica, luminosa ou de fixação dos fótons. A segunda, que é lenta, é uma fase enzimática, obscura ou de redução do dióxido de carbono e síntese da matéria orgânica. Nesta fase, o nitrogênio também desempenha um papel muito importante.

As reações de fotossíntese têm lugar nos cloroplastos, que são corpúsculos em forma de disco, nos quais ficam a clorofila e pigmentos acessórios, associados à fotossíntese. Nas plantas superiores, os cloroplastos têm de 4 a 8  $\mu\text{m}$  de diâmetro, por 1  $\mu\text{m}$  de espessura e cada cloroplasto compõe-se de corpos granulados com diâmetro entre 0,3 e 0,5  $\mu\text{m}$ . Essas dimensões devem influir na absorção luminosa, portanto a eficiência da

fotossíntese poderia talvez ser melhorada por manipulações genéticas.

Na folhagem das plantas, há perdas diretas por reflexão e transmissão, e perdas indiretas por convecção e calor latente de evaporação. Há ainda as perdas relativas à respiração e metabolismo, e ao transporte de matéria dos centros de reação fotossintética, para o desenvolvimento da planta. A figura 3 ilustra o fenômeno.



**Figura 3**

Por força dessas perdas e em função da espécie vegetal considerada, a eficiência do processo é bem menor do que os 33% acima calculados. A tabela 1, a seguir, indica os valores aproximados das perdas.

A faixa do espectro solar aproveitável para a fotossíntese corresponde a aproximadamente 50% da radiação que chega às folhas das plantas.

A reflexão, absorção e transmissão das radiações nas folhas absorvem cerca de 30%, e há uma perda da ordem de 72% no metabolismo da planta.

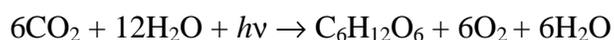
Ao final, computadas outras perdas, dependendo da espécie vegetal, a eficiência da fotossíntese fica entre 0,5% e 5,5%.

Ainda assim é significativa a quantidade de energia que se pode extrair de determinados vegetais.

<b>Luz incidente nas folhas</b>	<b>100%</b>
<b>Não disponível para fotossíntese</b>	<b>Disponível</b>
Luz fora da faixa com $\lambda_{\text{médio}} = 0,68\mu\text{m}$ : 50%	50%
Reflexão, transmissão: 30%	35%
Calor latente de evaporação: 25%	24,5%
Respiração, metabolismo, transporte: 72%	6,9%
Fotossíntese → Formação de biomassa	0,5 a 5,5%

**Tabela 1**

Voltando à reação de fotossíntese, observamos que seis unidades de  $\text{CH}_2\text{O}$  constituem uma unidade de  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ , de sorte que, do ponto de vista estequiométrico, o processo deve ser modelado pela seguinte reação:



Os principais compostos orgânicos sintetizados na planta são essencialmente glicídios ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), com poder calorífico da ordem de 3.600 kcal/kg (matéria seca), armazenados basicamente na forma de polímeros naturais, como a celulose, as hemiceluloses e a lignina. O componente mais abundante é a celulose, que entra com cerca de 20% em certas gramíneas, até cerca de 90%, nas fibras de algodão.

Esses compostos podem ser convertidos em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, mediante processamento mecânico, pirólise, hidrólise, fermentação, etc.

### “Plantações de energia”

A grande extensão territorial e as condições climáticas brasileiras são muito favoráveis para as chamadas “plantações de energia”, isto é, plantações de espécies vegetais direta ou indiretamente utilizadas como fonte de energia.

Além de serem renováveis e armazenarem energia para uso no momento oportuno, as plantações de energia oferecem as seguintes vantagens:

- Podem ser implantadas em larga escala, com tecnologia já dominada, em glebas descentralizadas (por exemplo, no cerrado ou em regiões degradadas), obedecendo a zoneamentos agro-ecológicos a serem elaborados em nível municipal, sob orientação dos órgãos responsáveis pelo meio ambiente e pela pesquisa agrícola (IBAMA, ANA, EMBRAPA e entidades estaduais e municipais correlatas).
- Não requerem grandes capitais, criam numerosos empregos na zona rural e não

agredem o meio ambiente, pelo contrário, contribuem para a estabilização das condições climáticas.

- Em muitos casos, as plantações de energia podem ser feitas nas proximidades do local de consumo, dispensando extensos e onerosos sistemas de transportes de combustíveis.
- Em princípio, a queima dos combustíveis vegetais não interfere no balanço de dióxido de carbono da atmosfera, pois as plantas consomem, em sua formação por fotossíntese, a mesma quantidade de dióxido de carbono que liberam, ao serem usadas como combustível. Aqui as coisas devem ser analisadas com cautela, pois essa vantagem só prevalece se as plantações de energia forem adequadamente dimensionadas e obedecerem a manejos em que os ciclos de plantio e colheita garantam que, ao crescerem, as novas plantas absorvam a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> que a emitida pela queima dos combustíveis produzidos nas safras anteriores. Por outro lado, convém assinalar que, nas operações de plantio e manejo das culturas energéticas, empregam-se máquinas que consomem combustíveis fósseis, além de fertilizantes e pesticidas, derivados de petróleo.

A tabela 2 indica algumas espécies vegetais apropriadas para plantações de energia, com os respectivos processos de conversão economicamente utilizáveis.

<b>Biomassa ou derivado</b>	<b>Processo</b>	<b>Combustível</b>
Cana de açúcar	Processamento mecânico	Bagaço
Fermentado de cana de açúcar, sorgo, etc.	Destilação	Etanol
Eucalipto e outras espécies florestais	Processamento mecânico	Lenha, <i>chips</i> , etc.
Óleos vegetais	Transesterificação	Biodiesel
Resíduos agrícolas, lixo urbano, etc.	Digestão anaeróbica	Metano
Aguapé, jacinto de água, etc.	Digestão anaeróbica	Metano
Resíduos agrícolas e da indústria madeireira	Pirólise e reforma	Hidrogênio
Etanol	Reforma	Hidrogênio
Algas verdes ( <i>Chlamydomonas</i> )	Bioconversão	Hidrogênio

**Tabela 2**

Para avaliar-se a quantidade de energia que se pode obter de uma dessas plantações, além de sua eficiência fotossintética, deve-se conhecer a potência média da radiação solar na região considerada, ao nível do solo.

Deve-se conhecer também o albedo, ou seja, a razão entre a radiação refletida por um elemento de superfície e a radiação total que aquele elemento recebe do Sol. De fato, sobre um elemento de superfície ao nível do solo incide não apenas radiação diretamente

emitida pelo Sol, com comprimentos de onda na faixa entre 0,3 $\mu\text{m}$  e 5 $\mu\text{m}$ , mas também radiação difundida por moléculas de gases atmosféricos, como nitrogênio, oxigênio, vapor de água, gás carbônico e outros. A tudo isso se somam as radiações com comprimentos de onda entre 4 $\mu\text{m}$  e 80 $\mu\text{m}$ , que são reemitidas do solo e refletidas de volta por nuvens e partículas em suspensão.

Essas informações podem ser obtidas em mapas de insolação e cartas de radiação, para diversas escalas de tempo (horária, diária, mensal e anual), indicando os valores da radiação solar em função da latitude e das características climáticas regionais. Os dados, geralmente expressos em *langleys* (1 langley = 1 cal/cm<sup>2</sup> = 11,6 Wh/m<sup>2</sup>), são apresentados em curvas indicativas dos valores da energia que chega ao solo, coletados em estações de medida distribuídas pelo mundo.

Para o Brasil, os mapas e cartas disponíveis indicam valores médios de 3.500 horas por ano, para a insolação, e cerca de 400 langleys/dia, para a incidência de radiação solar ao nível do solo.

As informações a seguir dão uma idéia do potencial de algumas plantações de energia.

- ***Cana de açúcar*** – Numa plantação bem formada, até 50% da área plantada são cobertos por folhas diretamente expostas à radiação solar. Por outro lado, dependendo da qualidade do terreno, das condições de irrigação e da espécie plantada, a eficiência fotossintética pode chegar a 2,5%. Nessas condições, a produtividade dos canaviais brasileiros pode ir a 90 toneladas de cana, por hectare, por ano.

De cada tonelada de cana extraem-se 80 litros de álcool etílico, com poder calorífico de 5.600 kcal/litro, além de 280 quilogramas de bagaço, com 50% de umidade e poder calorífico de 2.200 kcal/kg e 280 kg de palha com 50% de umidade, também com poder calorífico de 2.200 kcal/kg. Considerando que cerca de 90% dos sais minerais e demais nutrientes da planta concentram-se nas folhas, a palha não deve ser utilizada como combustível, sendo melhor que se decomponha no terreno, devolvendo-lhe os nutrientes.

Calculemos, à guisa de exemplo prático, a área de plantio necessária para alimentar uma destilaria de álcool com capacidade de 18.000 m<sup>3</sup>/ano (120.000 litros/dia, operando 150 dias/ano).

À base de 80 litros por tonelada, uma destilaria desse porte processaria 225.000

toneladas/ano de cana, e utilizaria a metade do bagaço para consumo próprio.

O bagaço excedente (31.500 toneladas/ano), poderia alimentar uma usina termelétrica, gerando cerca de 16.000.000 kWh por ano. Cumpre assinalar que, para isso, já se fabricam no Brasil caldeiras a bagaço, com capacidade de até 40 toneladas/hora de vapor, à pressão de 65 bar e temperatura de 400°C.

Como foi mostrado acima, a produtividade dos canaviais brasileiros pode chegar a 90 t/ha×ano, de sorte que, para o nosso exemplo, a área de plantio seria de 2.500 hectares. Na verdade, a área do canavial seria de 3.000 hectares, pois é necessário deixar uma margem de 20%, para que parte das terras fique em regeneração.

\* \* \*

Voltemos à tabela 2, acima, na qual o etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) aparece como uma possível fonte primária para a produção de hidrogênio. Trata-se de um caminho muito promissor para o Brasil, onde, como se sabe, o etanol é (ou pode ser) obtido por destilação de fermentado de cana de açúcar e de outras biomassas, tais como sorgo sacarino, milho, etc.

A partir daí, pode-se produzir hidrogênio por um processo em duas etapas:

1°. Uma reação endotérmica a alta temperatura, na presença de vapor de água (reforma a vapor), na qual o etanol é convertido numa mistura gasosa de H<sub>2</sub>; CO; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub> e o resíduo do vapor de água.

2°. Uma reação de deslocamento água-gás (*shift*), na qual o CO reage com H<sub>2</sub>O, produzindo H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Esta reação limita-se no equilíbrio, de modo que é necessário remover o resíduo de CO (por oxidação seletiva, por exemplo).

Como resultado final, são produzidos 6 *mols* de hidrogênio por *mol* de etanol, de acordo com a seguinte reação global:  $C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2$

- **Florestas industriais-energéticas** – O Brasil acumulou grande experiência no plantio, manejo e exploração de florestas industriais. A produtividade de uma floresta de eucalipto, por exemplo, pode chegar a 15 toneladas/hectare×ano, em regime sustentado. Assim, por exemplo, uma floresta de, digamos, 40.000 hectares, com finalidade industrial e energética, com 50% da madeira destinada à produção de energia, poderia fornecer 300.000 toneladas/ano de madeira industrial e o equivalente em energia a 90 toneladas/ano de petróleo, na forma de *pellets* de madeira, aglutinados de serragem, lenha, etc.

- *Plantas oleaginosas* – Sementes de plantas como mamona, dendê, soja, girassol, etc, podem ser processadas para a obtenção de um combustível genericamente designado por *biodiesel*, que também pode ser produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais já usados (em cozinhas, por exemplo).

O biodiesel apresenta inúmeras vantagens: é renovável, não é tóxico, é biodegradável e sua combustão não altera o balanço atmosférico de CO<sub>2</sub>. Sua produção começa por uma filtragem dos óleos vegetais (ou das gorduras animais), e de um processamento especial para a remoção de água e contaminantes. O material assim tratado é então misturado com um álcool (metanol é o mais empregado, mas pode-se empregar também etanol) e um catalizador (podem ser usados os hidróxidos de sódio ou o de potássio). As moléculas de óleo (triglicérides) são em seguida “craqueadas” e reformadas em ésteres, dando como subproduto o glicerol, que é usado na indústria farmacêutica.

Apesar dos esforços desenvolvidos por grupos de pesquisa da Petrobrás, Embrapa e Coppe, entre outros, são escassas as informações publicadas a respeito da experiência concreta, em escala industrial, para a produção e utilização de biodiesel no Brasil.

Quanto à produtividade, as informações são algo desencontradas, situando-se em torno de 500 litros/hectare×ano, para a soja, 600 litros/hectare×ano, para o dendê, e 1.200 litros/ hectare×ano, para a mamona.

## **Bibliografia**

1. Mathis, P. – “Les centres réactionnels photosynthétiques”, in Clefs CEA (Revista do Commissariat à l’Énergie Atomique), n° 5, abril de 1987.
2. Dumon, R. – “La Forêt - source d’énergie et d’activités nouvelles” – Masson, 1980.
3. Kreith, F. and Kreider, J. – “Principles of solar engineering” – Mc Graw Hill, 1978.
4. De Jong, B. – “Net radiation received by a horizontal surface on earth” – Delft University Press, 1973.
5. N.K. Boardman and A.W Larkun – “Biological Conversion of Solar Energy”, in “Solar Energy” – Pergamon Press (Série de conferências realizadas na Universidade de Sydney, em 1974).
6. Ioanides, T. – “Thermodynamic analysis of ethanol processors for fuel cell applications”, in “Journal of Power Sources”, 92 (2001).