

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

**O DECLÍNIO DA ERA DO PETRÓLEO E A TRANSIÇÃO DA MATRIZ  
ENERGÉTICA BRASILEIRA PARA UM MODELO SUSTENTÁVEL**

Joaquim Francisco de Carvalho

São Paulo

2009

**O DECLÍNIO DA ERA DO PETRÓLEO E A TRANSIÇÃO DA MATRIZ  
ENERGÉTICA BRASILEIRA PARA UM MODELO SUSTENTÁVEL**

Joaquim Francisco de Carvalho

Tese apresentada ao PPGE/USP, para  
a obtenção do título de doutor em  
energia.

Orientador  
Professor Doutor Ildo Luiz Sauer

São Paulo

2009

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho  
para fins de estudo ou pesquisa, citando-se a fonte.

Ficha catalográfica

Carvalho, Joaquim Francisco  
O Declínio da Era do Petróleo e a Transição da Matriz  
Energética Brasileira para um Modelo Sustentável.  
Tese de Doutorado – PPGE/USP - São Paulo 2009  
Orientador: Professor Doutor Ildo Luiz Sauer

1. Energia e entropia
2. *Decoupling*
3. Desenvolvimento sustentável

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA  
EP – FEA – IEE – IF**

**JOAQUIM FRANCISCO DE CARVALHO**

*“O declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira  
para um modelo sustentável”*

Tese defendida e aprovada em 6/11/2009 pela Comissão Julgadora:

---

Prof. Dr. Ildo Luiz Sauer – IEE/USP  
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

---

Prof. Dr. Rogério Cesar de Cerqueira Leite – UNICAMP

---

Prof. Dr. Roberto Schäffer – COPPE/UFRJ

---

Prof. Dr. Marcelo de Andrade Romero – FAU/USP

---

Dr. Alessandro Barghini – IEE/USP

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Ildo Sauer, cujo estímulo foi de fundamental importância para a realização deste trabalho.

Sou grato também ao Professor Cláudio Scarpinella, associado ao Programa de Pós-Graduação em Energia da USP (PPGE), que me enviou as palestras relacionadas ao tema da tese, apresentadas nos seminários por ele organizados para esse programa.

Especial agradecimento vai para o Professor Alessandro Barghini, pesquisador associado ao Laboratório de Estudos Evolutivos Humanos do IB/USP e ao PPGE, pelo substancial apoio na pesquisa bibliográfica, pelas boas sugestões oferecidas para a metodologia empregada na tese e pelo acesso que me franqueou à sua própria biblioteca. A ele o meu reconhecimento.

Agradeço igualmente ao professor Francisco Caruso, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, pela revisão do capítulo 3.

## **RESUMO**

Apresenta-se uma definição de sustentabilidade baseada na segunda lei da termodinâmica e mostra-se que, a partir dessa definição, é possível desatrelar o crescimento econômico do uso dos recursos naturais, a fim de evitar que as forças do mercado se oponham a uma reestruturação do setor energético que tenha o objetivo de passar da atual matriz energética, que é insustentável, para uma que o seja – usando apenas as fontes renováveis de energia de que o Brasil dispõe. A transição da matriz insustentável para uma sustentável implicará uma crescente racionalização do consumo, paralelamente ao emprego de energias renováveis e à redução do emprego de fontes não renováveis, tais como o petróleo e o gás natural. A partir de meados do presente século, a adaptação dos padrões de consumo e o desenvolvimento tecnológico permitirão que o emprego de fontes renováveis vá deslocando mais rapidamente as fontes não-renováveis, levando-as a uma posição tendente à anulação até o fim do século. No corpo da tese discute-se o emprego do princípio da precaução no planejamento energético e demonstra-se que o Brasil tem condições para se tornar praticamente independente de fontes não-renováveis de energia.

## **ABSTRACT**

Starting with a definition of sustainability based on the entropy law, which enable us to proceed a decoupling of economic growth and exploitation of natural resources, we demonstrate that Brazil has enough renewable energy sources to move away from the present energy matrix, which is unsustainable, to a sustainable one, through a transition process based on the increasing use of renewable energies and rationalization of consumption, simultaneously with gradual decrease in the use of non-renewable energies such as oil and natural gas. From the middle of this century on, the use of non-renewable sources should decrease more rapidly, approaching a marginal position at the end of the century. In the thesis it is discussed the precaution principle in energy planning and it is proved that Brazil has the necessary material conditions to become practically independent of non-renewable energy sources.

**Joaquim Francisco de Carvalho – TESE - PPGE – IEE - USP**

## SUMÁRIO

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
1 Introdução	5
2 Objetivo da tese e metodologia	8
3 O conceito de desenvolvimento sustentável	12
4 O princípio da precaução	29
5 Fontes de energia	37
5.1 Fluxos, estoques, depósitos e fundos de energia	40
5.2 Fundos de energia - fontes renováveis	41
5.2.1 O potencial hidrelétrico	42
5.2.2 Conversão de energia luminosa em matéria orgânica	43
5.2.3 “Plantações de energia” → biocombustíveis	47
5.2.4 Outras fontes renováveis	54
5.3 Depósitos de energia - fontes não renováveis → Carvão, petróleo, gás natural	55
6 Energia e sociedade - síntese histórica	58
7 O planejamento energético no Brasil	71
8 Cenários e tendências	75
8.1 O cenário em 2.006	78
8.2 O cenário tendencial, em 2.020	82
9 Estratégias de transição para a sustentabilidade	84
9.1 O lado da demanda	86
9.2 O lado da oferta	96
9.3 Um cenário tendente à sustentabilidade, em 2.030	110
10 Considerações finais e conclusão	112
Apêndice A - Duração das reservas brasileiras de combustíveis fósseis	115
Apêndice B - Ordenamento do território visando à sustentabilidade	118
Apêndice C - Florestas industriais e energéticas	124
Apêndice D - O etanol como matéria prima	131
Referências	136



## 1 INTRODUÇÃO

Na medida em que iam sendo descobertas e usadas, as diversas fontes de energia iam mudando os rumos da civilização humana. Entretanto, nenhuma transição de uma fonte para outra foi causada pelo completo esgotamento físico da anterior, mas sim por motivos de caráter social, econômico e geopolítico, ou por se terem encontrado alternativas melhores. Algo semelhante ocorre com os modelos de consumo de energia que vieram tomando forma a partir da Revolução Industrial, que deverão ser substituídos por força da degradação ambiental que provocam e de problemas políticos, ligados à limitação das reservas de petróleo e gás natural, cuja exploração se torna crescentemente problemática e onerosa. Nos últimos 120 anos, graças ao petróleo e, mais recentemente, ao gás natural, boa parte da humanidade se desenvolveu, pelo menos materialmente, a um ritmo até então inigualado – consumindo, para isso, energia solar acumulada por fotossíntese ao longo de centenas de milhões de anos.

Agora, os mais respeitados geólogos do mundo consideram que o pico da produção mundial de petróleo e gás ocorrerá nos próximos 5 a 10 anos, o que significa que a “idade do petróleo” está chegando ao fim. A tabela 1 mostra que, a partir de meados da década de 1.980, o mundo passou a usar mais petróleo do que ia descobrindo. Entretanto, antes de declinar abruptamente, o consumo deverá oscilar sob crescentes dificuldades na exploração, implicando um comportamento errático da demanda (Campbell, 2.005).

**Tabela 1** - Novas descobertas de petróleo *versus* consumo (em Gbep/ano)

<b>ANO</b>	<b>Descobertas</b>	<b>Consumo</b>
<b>1.930</b>	10,82	1,72
<b>1.940</b>	26,36	2,54
<b>1.950</b>	31,82	4,53
<b>1.960</b>	49,27	8,90
<b>1.970</b>	33,45	18,18
<b>1.980</b>	27,27	22,72
<b>1.990</b>	14,54	24,09
<b>2.000</b>	10,09	28,18
<b>2.010</b>	6,82*	34,10 <sup>¶</sup>
<b>2.020</b>	4,55*	40,45 <sup>¶</sup>
<b>2.030</b>	2,82*	46,30 <sup>¶</sup>

\* Extrapolações, não incluídas as reservas do pré-sal<sup>¶</sup> Previsões

Fontes: Campbell, 2.005; Aleklett, 2006

Da mesma forma que as fontes de energia usadas desde a antiguidade, o petróleo e o gás abundantes e baratos tiveram uma influência decisiva sobre a criação e desenvolvimento de novas tecnologias para a indústria, para a agricultura e para os serviços. Os processos produtivos e, conseqüentemente, os modelos econômicos e os hábitos de consumo da

sociedade moderna esteiam-se nessas tecnologias. Hábitos de consumo e modelos econômicos que são energeticamente ineficientes.

Foi graças aos fertilizantes e pesticidas de origem petroquímica e aos combustíveis derivados de petróleo usados na mecanização das lavouras, que a agricultura mundial chegou à “revolução verde”, que a capacitou a alimentar uma população que se elevou de 2,5 bilhões para 6,5 bilhões de habitantes, em pouco menos de 60 anos.

Ocorre que ainda não existem substitutos comparáveis ao petróleo e ao gás natural, no que diz respeito à densidade energética, à transportabilidade e a outras características, que lhes conferem as qualidades para serem usados em larga escala nos transportes, na indústria e na agricultura. Portanto o modelo energeticamente ineficiente não resistirá por muito tempo.

Por outro lado, o uso de combustíveis derivados de petróleo gera emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases de estufa, que vêm provocando sensíveis elevações na temperatura média da atmosfera, com conseqüências que podem comprometer seriamente a sobrevivência da espécie humana.

Um país com a população, a extensão territorial e peso econômico do Brasil, que depende basicamente de petróleo para operar sua infra-estrutura de transportes de cargas e passageiros, fazer produzir setores importantes de sua indústria e praticamente toda a sua agricultura, não deve aguardar que os problemas fiquem mais graves, para só então adotar medidas destinadas a ajustar sua matriz energética ao cenário de escassez desses combustíveis, cenário que será agravado pelas mudanças climáticas devidas aos gases de estufa, pelos quais o Brasil é um dos principais responsáveis.

É imperativo que modifiquemos, em curto prazo, os padrões de consumo da sociedade e que nos antecipemos no desenvolvimento de tecnologias apropriadas a fontes renováveis de energia, para evitar que o brusco declínio da oferta de combustíveis fósseis cause tragédias tais como fome, revoltas sangrentas e epidemias, disputas geopolíticas e guerras.

Modificar os padrões de consumo da sociedade e desenvolver tecnologias apropriadas para isso implica não apenas a redução dos desperdícios em geral, mas, principalmente, a reestruturação de modelos de urbanização, transportes, construção civil, produção e distribuição de alimentos, etc.

Não se pode esperar que o mercado, sem forte controle estatal, crie condições para que a oferta de energia e a demanda da economia respeitem a uma política energético-industrial integrada, que conduza a um *declouping* (desatrelamento) entre o crescimento econômico e o uso dos recursos naturais (van der Voet, E. *et al*, 2005).

Este desatrelamento é indispensável para que a produção fique limitada não apenas pelas reservas de recursos naturais, mas principalmente pela capacidade do meio ambiente ir reconstituindo os recursos naturais e reciclando os rejeitos gerados.

Ocorre que o mercado – com seus mecanismos de oferta e demanda, e de competitividade baseada em custos, não em impactos ambientais – exerce um papel decisivo nos processos de escolha de fontes de energia e expansão dos sistemas energéticos.

Se estes mecanismos prevalecerem, as reservas de combustíveis fósseis poderão ser ampliadas, seja com a exploração de novas reservas de petróleo convencional, como as das Províncias Petrolíferas do Pré-Sal, seja mediante o emprego de técnicas avançadas para obtenção de petróleos não convencionais e combustíveis sintéticos em geral, a partir de minérios betuminosos e do próprio carvão. Neste caso estar-se-ia optando por caminhos que levarão a humanidade à extinção num prazo mais curto do que aquele imposto pela degradação natural da biosfera.

Para se chegar à sustentabilidade, é indispensável que se criem e apliquem mecanismos pelos quais a expansão dos sistemas e a escolha das fontes de energia independa das atuais estruturas de custos e passem a ser regidas por critérios ligados aos impactos provocados sobre o meio ambiente, pela produção e consumo de energia. Este é o foco da presente tese. Deixamos de lado, portanto, a análise da influência da atual estrutura de custos, nos processos de escolha de fontes de energia e expansão dos sistemas energéticos, embora admitamos que – uma vez implantados mecanismos adequados para lidar com a questão energética num contexto abrangente, no qual os objetivos procurados sejam mínimos impactos ambientais e máximos ganhos de qualidade de vida – novos custos relativos serão estruturados. Este tema que foge ao escopo do presente trabalho. Por outro lado, como esta tese visa a demonstrar que o Brasil dispõe de fontes renováveis de energia que lhe permitirão chegar à sustentabilidade, os combustíveis não renováveis não foram abordados, a não ser de passagem, em virtude do papel que ainda têm a desempenhar durante a transição da matriz insustentável para uma sustentável.

## 2 OBJETIVO DA TESE E METODOLOGIA

Esta tese tem o objetivo demonstrar que o Brasil dispõe de fontes renováveis de energia que lhe permitirão passar da atual matriz energética – que é insustentável – para uma tendente à sustentabilidade em médio prazo, através de um processo de transição baseado na crescente racionalização do consumo de energia, paralelamente à redução do emprego de fontes não renováveis, tais como o petróleo e o gás natural que, ao final do horizonte de previsão considerado no trabalho, deverão ocupar posições declinantes e tendentes à anulação de meados para o final do presente século.

Em outras palavras, o Brasil pode atingir um estado energeticamente estável, sem enfrentar situações de carência de energia que exigiriam soluções improvisadas, com impactos bem mais traumáticos do que os de soluções antecipadamente estudadas e gradativamente implantadas.

Para demonstrar a tese propusemos uma definição quantitativa do conceito de desenvolvimento sustentável baseada na lei da entropia, a partir da qual pode-se proceder a um desatrelamento, ou *decoupling*, entre crescimento econômico e uso dos recursos naturais, com o objetivo de se controlar o papel do mercado no estabelecimento dos preços da energia e nas decisões sobre investimentos no setor energético, tornando possível ordenar os diversos projetos e atividades humanas apenas em função das magnitudes de seus impactos ambientais.

A fim de contornar imprecisões decorrentes da atual insuficiência de dados quantitativos sobre tais magnitudes, assinalamos a importância do princípio da precaução, nos planos de expansão da oferta de energia.

Apresentamos as fontes de energia disponíveis no mundo e mostramos como a civilização humana foi influenciada pelas formas de energia que iam sendo usadas, sobretudo a partir de meados do século XIX, ou seja, ao longo da “era do petróleo”, que agora está chegando ao fim.

Contudo – sem a adoção de padrões de consumo que englobem não apenas os setores energético e industrial, isoladamente, mas também os modelos de urbanização e os sistemas de produção, transporte e distribuição de alimentos e de água – sobrevirá certamente uma situação dramática.

Na demonstração da tese adotamos a metodologia dos cenários alternativos e partimos do cenário atual – que foi elaborado com base no Balanço Energético Nacional de 2.005, publicado pela EPE em 2.006 (BEN 2.006/2.005). Delineamos, então, dois cenários para o ano 2.030:

- Um cenário tendencial, que reflete as projeções do Plano Nacional de Energia 2.030 e do Plano Decenal de Energia 2008-2017.
- Um cenário praticamente estável, tendente à sustentabilidade em curto prazo, no qual a demanda foi otimizada em função de necessidades básicas da sociedade. Este cenário foi tomado como normativo e será designado por **cenário ideal**.

Confrontamos a disponibilidade de recursos energéticos disponíveis no Brasil, com a demanda de energia quantificada no cenário ideal e procuramos identificar condições básicas para validar a hipótese de que o país dispõe de fontes renováveis de energia, suficientes para chegar a um estado energeticamente estável, sem prejuízo da melhoria da qualidade de vida.

Neste contexto, a expressão **estado estável** não implica estagnação da economia, como se poderia supor, mas sim um estado em que a melhoria da qualidade de vida da população decorre mais de avanços tecnológicos que propiciem o aperfeiçoamento qualitativo dos bens produzidos e seu consumo racional e equitativo – do que do crescimento da produção física de bens.

Para elaborar os cenários tendencial e ideal analisamos as tendências da conjuntura brasileira (focalizando especialmente o setor energético) entre os anos 2.000 e 2.005 e descrevemos o cenário de 2.005 (tomado nesta tese como cenário atual).

Entendemos que a desagregação dos dados referentes à demanda e oferta de energia no país nada acrescentaria à demonstração da tese, de modo que, em benefício da objetividade, colocamos esses dados em blocos agregados e, assim procedendo, estudamos as previsões do Plano Decenal de Energia 2008-2017 e do Plano Nacional de Energia 2.030 e esboçamos o cenário tendencial do ano 2.030, que é insustentável.

Como alternativa a este cenário, procuramos definir estratégias para os diversos setores da economia, passíveis de serem supridos por fontes de energia renováveis e ambientalmente pouco agressivas.

Estudamos, por fim, uma demanda otimizada e – tendo em conta a disponibilidade de fontes renováveis de energia e a existência de tecnologias apropriadas – ajustamos a oferta e elaboramos o cenário ideal.

O setor energético é parte integrante do complexo político-econômico-social, portanto sua configuração e os rumos de sua evolução dependem de fatores técnicos diretamente relacionados à energia – e também de pressões políticas, sociais e econômico-financeiras.

Assim, para que não sejam apenas exercícios de projeções desvinculadas da realidade, os cenários do setor energético devem ser inseridos em cenários mais abrangentes, que descrevam os aspectos sociais, políticos e econômico-financeiros próprios da época

considerada. Daí a necessidade de que a estratégia de investimentos no setor energético seja planejada não apenas com base em fatores diretamente ligados à produção e consumo de energia – mas também em função de condicionantes e limitações naturais do próprio processo decisório, nas áreas pública, tecnológica e empresarial. Este processo deve ser transparente e aceito pela sociedade como um todo.

A gradativa transição do modelo insustentável para um sustentável deverá resultar de ações empreendidas pela sociedade como um todo, o que engloba a administração pública, o empresariado, as universidades, os meios de comunicação e o público em geral. O modelo sustentável seria implantado mediante ajustes gradativos das políticas de investimentos públicos e privados na infra-estrutura energética e nos setores diretamente produtivos, ou seja, a indústria, a agricultura, o comércio e os serviços.

Uma análise retrospectiva dos erros e acertos cometidos e constatados na década de 1.980, decorrentes das estratégias de investimentos públicos no setor hidrelétrico, e de investimentos privados no setor agroenergético (Proálcool), poderá ser uma importante fonte de informações para a formulação de uma política energético-industrial a ser posta em prática pelo governo em colaboração com o empresariado, visando à sustentabilidade. Este tema foge ao escopo da tese, entretanto deve-se reconhecer que a passagem ao estado sustentável somente será viável se os investimentos estatais na infra-estrutura energética forem estrategicamente aplicados, em harmonia com políticas de incentivos ao desenvolvimento tecnológico a aos investimentos do setor privado no setor energético.

Um grande obstáculo para a transição ao modelo sustentável é a inércia dos consumidores, que não tomariam de *motu proprio* a iniciativa de readaptar as suas fábricas, sistemas de transportes, estabelecimentos comerciais e residências, para o uso de novas formas de energia. Outro importante obstáculo está nos interesses enraizados há mais de um século na exploração, transporte, distribuição e comercialização de petróleo e eletricidade.

A fim de se definir um horizonte de previsão realista para que se planejem e implantem políticas e se adotem medidas concretas, destinadas a evitar que o inexorável escasseamento da oferta de petróleo leve o país a uma situação dramática, estimamos, no Apêndice A, a duração das reservas brasileiras de petróleo e gás natural. É possível que o petróleo, o gás natural e o carvão continuem sendo empregados em escala mundial por muitas décadas, no entanto optamos por tratá-los apenas de passagem neste trabalho, pelo papel que ainda têm a desempenhar, na fase de transição para a sustentabilidade. De resto, entendemos que seria incoerente propor um modelo sustentável, mantendo indefinidamente em sua matriz

energética combustíveis não-renováveis, que ademais podem elevar a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera a níveis incompatíveis com a sustentabilidade.

Analizamos possíveis estratégias energético-industriais para um plano de longo prazo, por forma a assegurar uma transição equilibrada entre a atual matriz, em que o petróleo ocupa uma posição importante, para matrizes crescentemente baseadas nas fontes renováveis.

Discutimos, neste ponto, a viabilidade técnica de se reduzirem as produções dos segmentos energointensivos ao mínimo indispensável para abastecer o mercado interno, deixando, para as exportações, apenas estreitas margens (a serem definidas em conjunto pelo governo e o setor privado), em função da política de comércio exterior do país, independentemente de vantagens de curto prazo, que podem ser apenas aparentes.

Por fim, constatamos que, no tocante à energia elétrica, o país dispõe de fontes renováveis suficientes para chegar à sustentabilidade por volta de 2.030. No que diz respeito aos combustíveis, é possível obtê-los a partir de fontes renováveis numa escala suficiente para ir aos poucos tomando o rumo da sustentabilidade, mediante uma gradativa reestruturação dos padrões de ocupação do território, dos modelos de urbanização e dos sistemas produtivos.

Com isso, validamos a hipótese de que o país dispõe de fontes renováveis de energia, suficientes para, em médio prazo, passar da matriz energética insustentável para uma tendente à sustentabilidade, o que demonstra a tese.

### 3 O CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A noção de desenvolvimento sustentável geralmente aceita baseia-se no documento *Nosso Futuro Comum*, de 1.987, também conhecido como *Relatório Brundtland*, no qual definiu-se como desenvolvimento sustentável aquele que satisfaça as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades (WCED, 1987).

Sustentáveis, portanto, seriam ações que se possam manter e repetir indefinidamente, nas mesmas condições. Trata-se de uma definição adequada para os foros políticos e diplomáticos, porém insuficiente para que se possa relacionar diferentes empreendimentos ou ações visando a um objetivo comum, por ordem de magnitude de seus impactos ambientais.

Antes de se estabelecer tal relacionamento é necessário distinguir três categorias de sustentabilidade. São elas a sustentabilidade *econômica*, a sustentabilidade *social* e a sustentabilidade *ambiental* (Goodland, R.; Daly, H., 1996).

Os engenheiros e cientistas naturais pouco as distinguem, porque partem da premissa de que a tecnologia tem o poder de transformar recursos naturais em diversas formas de capital, ou em produtos essenciais para a sobrevivência da sociedade.

Os economistas (pelo menos os da corrente dominante) acreditam que a ciência econômica tem instrumentos para fazer com que as forças do mercado levem as trocas de bens e serviços (que são produzidos mediante emprego de capital) a satisfazer com máxima eficiência as necessidades da sociedade. Eles também entendem que a tecnologia sempre pode transformar capital natural, em capital “feito pelo homem” (*man made capital*, isto é, estradas, casas, fábricas, produção industrial e agrícola, etc.) e agrupam terra, recursos minerais, capacidade do ambiente para reciclar rejeitos, força de trabalho e o mencionado capital “feito pelo homem”, num pacote homogêneo – o capital, *tout court*. Daí que, para eles – em especial para os seguidores de R. Solow – sustentabilidade equivale a “capital total constante” (Veiga, 2005). Ou seja, o valor aquisitivo do capital (e sua rentabilidade) devem ser conservados, independentemente das limitações colocadas pelas dimensões do planeta.

Os cientistas políticos e sociais dão o nome de sustentabilidade indistintamente a condicionantes básicas da sustentabilidade social, tais como coesão da sociedade em torno de objetivos comuns; participação no processo democrático, boa governança, solidariedade, evolução cultural, acesso à educação, à alimentação e à assistência médica e outras.

Existem áreas de superposição da sustentabilidade econômica com a social, mas é evidente que ambas dependem da sustentabilidade ambiental que, portanto, é prioritária.



Até há poucos anos, o PIB era praticamente o único indicador do desempenho econômico e social, porém, junto com as crises do petróleo e a conscientização do público em relação às mudanças climáticas, tem crescido o interesse de economistas, empresários e governantes, pelo problema da sustentabilidade, como demonstra a iniciativa do Presidente da República Francesa de criar uma comissão para estudar e propor formas de medir o desempenho econômico, relativamente ao progresso social (COMESP, 2009).

Já se reconhece que o PIB confunde um conceito quantitativo, o *crescimento* – com um conceito qualitativo, o *desenvolvimento*, e percebe-se que o conceito de “crescimento sustentável” é um oxímoro, pois não pode haver sustentabilidade acima da capacidade de suporte (*carrying capacity*) dos territórios, pois o capital feito pelo homem (*man made capital*) não pode substituir o capital natural (Goodland, R.; Daly, H.).

Em outras palavras, o crescimento tem que parar num estado de equilíbrio, enquanto o desenvolvimento pode continuar, graças ao aprimoramento da educação; ao aperfeiçoamento dos processos de produção e da qualidade dos produtos; à racionalização das infra-estruturas e sistemas de transportes de pessoas e de cargas e assim por diante. Mas isso não pode ser feito com aumentos da produção acima dos limites de impostos pelo caráter finito dos recursos naturais e da oferta de energia, mas sim com a evolução cultural da sociedade e o progresso científico e tecnológico. O matemático e químico Alfred Lotka já tinha observado que os organismos dotados de sistemas mais eficientes para utilizar a energia livre levam vantagem na luta pela preservação da espécie (Lotka, 1.922), e o economista Nicholas Georgescu-Roegen (Roegen, 2003) procurou estabelecer as bases teóricas de uma economia ecológica e socialmente sustentável. Linha semelhante foi posteriormente seguida principalmente pelo ecologista americano Howard T. Odum, na formulação da teoria dos sistemas ecológicos, ou ecossistemas.

Um pressuposto lógico para uma definição quantitativa de sustentabilidade é o de que esta depende do equilíbrio entre a dispersão de massa e energia proveniente das atividades econômicas, de um lado – e a capacidade do meio ambiente de renovar a energia e absorver o calor residual e os rejeitos produzidos, do outro. Considerando este pressuposto, propusemos, nesta tese, uma definição de desenvolvimento sustentável baseada em alguns conceitos elementares da termodinâmica, que permitam medir a magnitude dos desequilíbrios causados pelos impactos ambientais diferentes empreendimentos ou ações humanas visando a um objetivo comum (produzir alimentos, construir casas, transportar pessoas, etc.) segundo a magnitude dos respectivos impactos ambientais. A seguir, vamos relembrar esses conceitos.

**Sistemas** que não interagem com nenhum outro sistema são ditos isolados. Sistemas em que haja troca de energia, mas não possa haver troca de matéria com o ambiente, são chamados sistemas fechados. Sistemas em que possa haver troca de energia e matéria com o meio exterior são sistemas abertos.

O primeiro princípio da Termodinâmica, ou princípio da conservação de energia estatui que a energia interna de sistemas isolados se mantém constante. Portanto estes sistemas ficam sempre em regime de estado estacionário (*steady state*).

O segundo princípio, em sua forma mais geral, estabelece que em qualquer interação de um sistema com o meio exterior, ou em processos internos (mesmo em sistemas isolados), a entropia do sistema nunca diminui.

Assim, para sistemas isolados, a irreversibilidade macroscópica é uma das formas preferidas de se enunciar o segundo princípio: *A entropia de um sistema isolado nunca decresce*. Sistemas abertos também podem manter-se em estado de regime estacionário, recebendo (ou emitindo) energia – e matéria – de fontes externas e descartando (ou recebendo) para (ou do) o seu exterior a mesma quantidade de energia recebida (ou emitida), e o acréscimo (ou o decréscimo) de entropia (Glansdorff, P. e Prigogine, I, 1971).

Consideremos agora dois estados de equilíbrio de um sistema fechado, situados numa vizinhança de amplitude  $\varepsilon \rightarrow 0$  e designemos por  $S(A)$  e  $S(B)$  as suas entropias.

Num processo reversível, a variação de entropia entre esses dois estados é o quociente entre a quantidade de energia transferida na passagem de um estado a outro ( $dQ$ ), e a temperatura absoluta ( $T$ ), ou seja,  $dS = dQ/T$ . Portanto:

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

Como o primeiro princípio da termodinâmica estabelece que a energia total de um sistema isolado deva ser conservada e o segundo princípio impõe a restrição de que a entropia não diminua, depreende-se que, em sistemas isolados, a energia livre vai se degradando e produzindo entropia, até chegar a um estado de equilíbrio, de máxima entropia, que é mantido. Portanto, o ganho de entropia implica uma transição para estados mais prováveis.

O “sistema Terra” não é isolado, como não o são os subsistemas que o compõem, pois todos trocam energia e matéria com sistemas circunvizinhos.

A Terra é de fato um sistema aberto, que troca energia com o Sol, ou seja, um sistema dissipativo, que permanece em estado de regime estacionário graças a um permanente contato com uma fonte externa de energia. Na verdade, a Terra troca energia e matéria com o universo, pois recebe radiações (e meteoritos) e emite radiações numa ampla gama de

comprimentos de onda. Sistemas com essas características são ditos em *não-equilíbrio termodinâmico* e, neles, o segundo princípio da termodinâmica toma a forma de uma equação de continuidade, que rege as trocas de energia de diversas entropias através de suas fronteiras.

Tal equação coloca a variação da entropia do sistema na forma de um acréscimo de entropia internamente a ele, somada ao fluxo líquido de entropia que atravessa as suas fronteiras, isto é,  $dS/dT = dS_{\text{int}}/dT + dS_{\text{ext}}/dT$ , onde  $dS/dT$  é a variação de entropia do sistema;  $dS_{\text{int}}$  é a soma algébrica das variações de entropia dos diversos subsistemas que compõem o sistema em questão e  $dS_{\text{ext}}/dT$  é o fluxo líquido de entropia que atravessa as suas fronteiras (Kleidon e Lorez, 2004).

A forma de energia predominante no universo é a gravitacional. Basicamente, é a energia gravitacional que determina a direção do fluxo geral de energia no Universo, não apenas por ser predominante, mas também por ser de máxima qualidade, isto é, não degrada.

Qualquer porção de matéria existente no espaço tem energia gravitacional, que pode ser liberada na forma de luz e calor pelo colapso gravitacional da matéria, ao qual se opõem barreiras tais como, principalmente, as dimensões do próprio universo, já que a gravidade é inversamente proporcional ao quadrado dessas dimensões. A energia de rotação das galáxias também é uma barreira. No caso de estrelas, a principal barreira ao colapso gravitacional são as reações nucleares que se processam em seu interior (Dyson, 1971).

Em última análise, o Sol é um reator a fusão nuclear, contido numa “envoltória de contenção gravitacional”. Sob a atração gravitacional, a densidade em seu centro é de  $150 \text{ g/cm}^3$  e a temperatura é da ordem de  $1,5 \times 10^7 \text{ K}$ . A energia emitida por ele tem origem no ciclo próton-próton, com uma reação do tipo  $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + \text{neutrino}$ , seguida de  ${}^2\text{H} + \text{próton} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{fóton}$  e de outras, até chegar a  $2p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \text{ neutrinos} + 27 \text{ MeV}$ , que é, em média, a energia liberada por reação (Cassé, 2004).

A principal fonte de energia da Terra são fótons de alta energia provenientes de reações desse tipo, que ocorrem no Sol e que chegam à Terra num fluxo de baixa entropia. Entre muitas outras coisas, esta energia responde pela fotossíntese, que dá origem aos microorganismos e vegetais. Portanto, direta ou indiretamente, a energia solar dá origem aos biocombustíveis e os combustíveis fósseis, que estão hoje entre as fontes de energia mais usadas pela humanidade.

O Sol emite radiação para o espaço numa larga faixa de comprimentos de onda, à temperatura de sua superfície. Vimos acima que estas radiações resultam da atração gravitacional exercida no centro do Sol e, como a gravitação não provoca movimentos caóticos, as radiações por si não produzem entropia. Falaremos disso mais adiante.

Por fim, há o urânio e o tório, que ficaram preservados na crosta terrestre graças à forte tensão superficial, própria de seus núcleos fisséis.

A radiação emitida pelo Sol está na temperatura de sua superfície, que é da ordem de 5.760 K. Para ficar em estado de regime estacionário, a Terra tem que reenviar ao espaço a mesma quantidade de energia que recebe do Sol.

Externamente à órbita terrestre, o fluxo de radiação solar (“fótons amarelos”, de baixa entropia) chega à fronteira da atmosfera à temperatura de 5.760 K e, ao passar pela Terra, vai-se degradando através de processos “diabáticos”, isto é, diatérmicos e difusivos, até cair para a temperatura da radiação emitida pela Terra ao espaço.

Se admitirmos que a Terra seja um corpo negro a uma temperatura  $T_{\text{terra}}$ , o balanço energético do processo em regime estacionário pode ser modelado pela seguinte expressão:

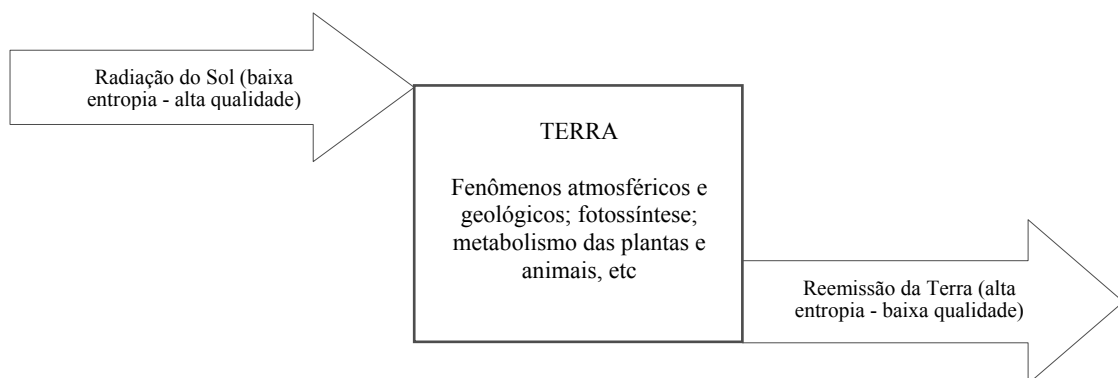
$$\frac{I_0}{4} (1 - \alpha_E) - \sigma_B T_{\text{earth}}^4 = 0, \quad (2)$$

onde  $I_0$  é fluxo solar na órbita da Terra, fora da atmosfera, ou constante solar ( $1.367 \text{ W/m}^2$ );  $\alpha_T$  é o albedo terrestre ( $\sim 0,30$ );  $\sigma_B$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ );  $T_{\text{Terra}}$  é a temperatura da radiação emitida isotropicamente pela Terra.

Resolvendo para  $T_{\text{Terra}}$ , temos a temperatura final da radiação terrestre ao espaço:

$$T_{\text{Terra}} = (41,88 \times 10^8)^{1/4} \approx 255 \text{ K} \quad (3)$$

Portanto, a energia emitida isotropicamente pela Terra (fótons “vermelhos”, de alta entropia) está a uma temperatura de apenas cerca de 1/20 da temperatura do fluxo solar incidente. A figura 1 apresenta um modelo simplificado deste processo.



**Figura 1** – A Terra como sistema aberto em não-equilíbrio termodinâmico e regime estacionário.

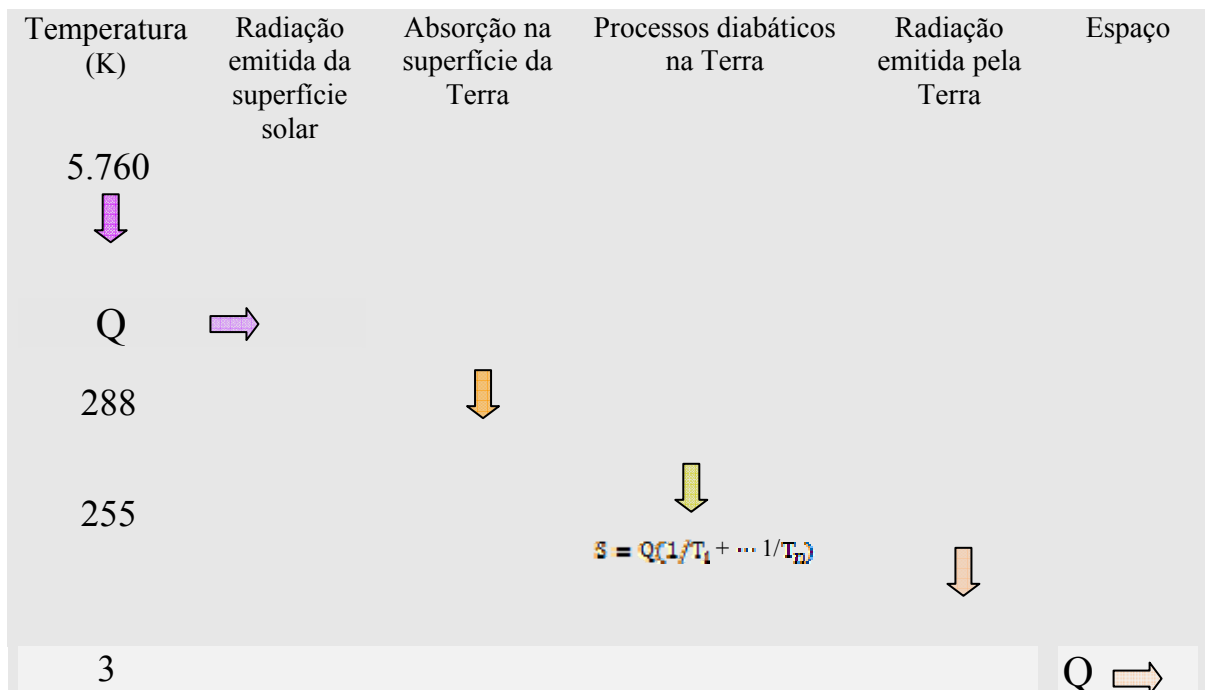
Ocorre que a Terra não é um corpo negro e, de acordo com medições feitas em estações metrológicas existentes pelo mundo afora, inclusive nas regiões polares e tropicais, a temperatura média da atmosfera fica em torno de 288 K, isto é, 15 °C. Esta pequena diferença

de temperatura é devida ao efeito estufa, cuja magnitude é, portanto, da ordem de  $288\text{ K} - 255\text{ K} = 33\text{ K}$ . Assim, em virtude do efeito estufa, a temperatura média da atmosfera fica em torno de  $288\text{ K}$ . Muito abaixo ou acima de  $288\text{ K}$  a vida humana seria insustentável.

Dada a atual composição da atmosfera terrestre, o vapor de água responde por  $2/3$  do efeito estufa, ou seja,  $22\text{ K}$ . A maior parte do restante vem do  $\text{CO}_2$ , ( $8\text{ K}$  a  $9\text{ K}$ ), enquanto gases como o  $\text{CH}_4$ , o  $\text{N}_2\text{O}$ , o  $\text{O}_3$  e os clorofluorcarbonetos de origem antrópica contribuem com algo em torno de  $2\text{ K}$  a  $3\text{ K}$  (Catling, 2005).

Mostramos anteriormente que os fótons solares de alta energia atingem a fronteira extrema da atmosfera com alta energia (frequências em torno de  $7,5 \times 10^{14}\text{ Hz}$ ) e à temperatura de aproximadamente  $5.760\text{ K}$  e, depois, são irradiados isotropicamente pela Terra com baixa energia, (frequências em torno de  $0,38 \times 10^{14}\text{ Hz}$ ), à temperatura de aproximadamente  $255\text{ K}$ .

Como a energia de um fóton é igual a  $h\nu$  (onde  $h$  é a constante de Plank e  $\nu$  é a frequência do fóton considerado), para que um fluxo de fótons de alta energia seja equilibrado por emissões de baixa energia, é necessário que a diferença de energia dos fótons seja compensada pelo seu número. Por isso, o número de fótons enviados pela Terra ao espaço deve ser cerca de 20 vezes maior do que o número de fótons recebidos do Sol. A figura 2 esquematiza as etapas da degradação da energia solar, para o caso da Terra.



**Figura 2** – Etapas da degradação da energia livre proveniente do Sol.

Se a Terra não existisse, os fótons solares seguiriam normalmente seu caminho; portanto a dupla Sol-Terra é criadora (ou multiplicadora) de entropia.

Por dizê-lo figuradamente, o preço pago pela Terra e outros planetas para se manterem em estado estacionário é uma contribuição para aumentar a entropia do Universo.

A degradação de energia em processos terrestres e a correspondente produção de entropia estabelecem a direção geral de todos os processos que ocorrem na Terra, resultando finalmente no balanço energético estabilizado, conforme o cálculo que fizemos linhas acima.

De acordo com o Modelo Padrão, dez segundos depois do instante da criação (*Big Bang*), há 15 bilhões de anos, a temperatura do Universo teria sido de  $3,9 \times 10^9$  K. Setecentos mil anos depois era de 3.000 K, e veio caindo mais lentamente, até chegar a cerca de 3 K, que é temperatura atual da radiação de fundo (Weinberg, 1980). Os astrônomos e cosmólogos calculam que, daqui a outros 15 bilhões de anos, a temperatura do Universo deverá ter caído para algo em torno de 1,5 K (Weinberg, *op.cit*).

Seja como for, todo fenômeno que ocorre na Terra e em outros planetas contribui para aumentar, embora infimamente, a entropia do Universo, por força da degradação de energia de alta qualidade (baixa entropia), em formas de energia de baixa qualidade (alta entropia), que vão ficando cada vez menos utilizáveis. É isto que nos leva naturalmente à idéia de equilíbrio final – ou “morte térmica do Universo” – quando se atingir a máxima entropia.

Na escala temporal humana, que é a que nos interessa nesta tese, foi graças ao desequilíbrio térmico entre a atmosfera terrestre, que está a uma temperatura média de 288 K, e o Universo, que é de aproximadamente 3 K, que se originaram e se mantêm as formas de vida que conhecemos.

Como foi dito acima, em sua passagem pela Terra a energia solar incidente vai-se degradando através de diversos processos. Por exemplo, o transporte de calor de regiões quentes para regiões frias e a circulação atmosférica. Este transporte é associado à circulação atmosférica, que por sua vez é função dos gradientes de temperatura entre o equador e os pólos. Todos esses fenômenos são dissipativos e produzem entropia, seja no atrito do ar com a superfície terrestre, seja no próprio atrito intermolecular e assim por diante.

Tratando-se de processos diabáticos, não se pode medir diretamente sua contribuição para a produção global de entropia do sistema Terra. Mas pode-se avaliar, em termos aproximados, as contribuições de cada um – com base nos fluxos de energia e em estimativas das faixas de temperatura em que cada processo ocorre. Assim, o aquecimento diabático, que é a principal forçante da circulação atmosférica global, pode ser estimado por meio de parâmetros de processos físicos envolvidos, tais como fluxos de radiação, liberação de calor latente de condensação; troca de calor sensível entre a atmosfera e a superfície etc.

O ciclo hidrológico global se deve à evaporação da água de superfícies oceânicas quentes (e evapotranspiração das florestas), para atmosferas frias, não saturadas, com a subsequente condensação a temperaturas mais baixas e precipitação, consumindo energia e produzindo entropia. Note-se que a precipitação por si não gera entropia, pois resulta da ação da gravidade, que não produz movimentos caóticos.

Nem todos os fótons de alta energia que vêm do Sol se degradam imediatamente em fótons de baixa energia. Uma fração deles é retida por meio de reações fotossintéticas que ocorrem na biosfera, “armazenando” esta fração, por assim dizer.

A energia armazenada equivale à diferença entre a energia química contida nos compostos orgânicos sintetizados (e no oxigênio liberado), e aquela contida no dióxido de carbono e na água da atmosfera que alimentam a fotossíntese. Esta energia pode ser estimada em termos da variação da energia livre no processo. Como se vê, a vida no planeta depende de energia solar, que, através da fotossíntese, forma organismos complexos, liberando entropia.

Para manter seu metabolismo e realizar o trabalho de se reproduzir, crescer e se movimentar, todo ser vivo depende de uma fonte de energia livre. Uma cadeia alimentar é uma seqüência de processos em que plantas se formam por fotossíntese, animais herbívoros se alimentam de plantas e se transformam em alimento para os carnívoros, impedindo que uma fração dos fótons solares se degrade imediatamente ao passar pela Terra. É interessante lembrar que, em fevereiro de 1943, na conferência “What is Life?”, apresentada no Trinity College, em Dublin, Schrödinger abriu novas perspectivas para as pesquisas no campo da biologia e até no da genética, quando mostrou que a vida mantém ordem degradando energia livre e produzindo rejeitos de alta entropia (Schrödinger, 1967).

A energia livre a que se referiu Schrödinger encontra-se, portanto, no ambiente natural e, direta ou indiretamente, provém da fotossíntese.

Além das fontes “bionergéticas”, que têm origem na fotossíntese, há no meio ambiente fontes de energia fósseis, físseis, geotérmicas e gravitacionais.

Na equação (1) a integral foi tomada sobre uma transformação reversível entre dois estados de equilíbrio. Se a transformação for irreversível, prevalece a desigualdade

$$S(B) - S(A) > \int_A^B \frac{dQ}{T}. \quad (4)$$

A função entropia,  $S$ , é crescente em  $Q$  porque, ao se transferir calor para qualquer sistema, intensifica-se o movimento térmico dos átomos que o compõem. Isto equivale a aumentar o caos na distribuição desses átomos, conforme os diversos estados de seu movimento microscópico.

Não é possível descrever o comportamento de cada micro-sistema de um sistema (ou de cada átomo de um composto), mas, com ferramentas da mecânica estatística, é possível caracterizar quantitativamente o estado termodinâmico deste sistema, em função do número de micro-estados que o definem. Este número representa o peso estatístico, ou probabilidade, do estado termodinâmico em questão. Um sistema bem organizado tende a se fragmentar em muitas partes. Qualquer sistema abandonado a si mesmo tende a passar para um estado mais provável, ou de maior peso estatístico – ou de maior entropia. Por outras palavras, a entropia de um sistema é diretamente proporcional ao número de seus elementos.

Isto permite o estabelecimento de uma correlação entre a Termodinâmica, a Mecânica Estatística e a Teoria da Informação, que também usa métodos da Mecânica Estatística. De fato, o número de indicações necessárias à descrição de um objeto elementar é menor do que aquele necessário para descrever um objeto composto de muitos elementos.

A partir do estudo do comportamento cinético-molecular de gases em sistemas isolados, Boltzmann demonstrou a existência de uma relação funcional entre o logaritmo do número que indica a probabilidade do estado de um micro-sistema, e sua entropia, definida pela clássica expressão  $S = k \times \ln \pi$ , onde  $S$  é a entropia,  $k$  é a constante de Boltzmann e  $\pi$  é a referida probabilidade. A probabilidade  $\Pi$  de que um sistema que conste de  $n$  micro-sistemas se encontre num estado  $\Omega$ , é igual ao produto das probabilidades  $\pi_1$  e  $\pi_2 \cdots \pi_n$  de que cada um desses micro-sistemas se encontre num estado que contribua para que o sistema composto se encontre no estado  $\Omega$ , ou seja,  $\Pi = \pi_1 \times \pi_2 \cdots \times \pi_n$ .

Portanto a entropia do sistema composto dos  $n$  mencionados subsistemas será:

$$S = k \cdot \ln \Pi = k \ln (\pi_1 \times \pi_2 \cdots \times \pi_n) = k \cdot \ln \pi_1 + k \cdot \ln \pi_2 \cdots + k \cdot \ln \pi_n = S_1 + S_2 \cdots + S_n .$$

Isso é trivial e pode ser generalizado, de forma que a variações de entropia tem a propriedade aditiva, ou seja, a ordem de um sistema composto de  $n$  micro-sistemas varia na medida da soma das variações das ordens destes micro-sistemas:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (5)$$

Ressalve-se que o argumento de Boltzmann é estritamente válido para sistemas gasosos e outros coletivos micro-canônicos, isto é, sistemas isolados cujas partes praticamente só interagem o suficiente para que se estabeleça o equilíbrio termodinâmico. Em coletivos canônicos (que compreendem sistemas líquidos e sistemas em transição de fase gás-líquido), assim como na Teoria da Informação de Shanon e em sua reformulação por Jaynes, a entropia



é definida como a falta de informação sobre o estado de um sistema, sendo expressa em função do *valor médio* do logaritmo do número que indica a sua probabilidade.

Na formulação dos matemáticos A. Kolmogorov e J. Sinai, a entropia é a razão assintótica de criação (ou destruição) de informação mediante a iteração, no tempo  $t$ , de um isomorfismo com núcleo compacto e medida preservada (Ruelle, 1996, p. 69 a 71), como, por exemplo, numa aplicação do tipo  $x_{t+1} = \lambda x_t (1 - x_t)$ , com  $x_t \in [0,1]$ .

Esta formulação poderia ser empregada na modelagem matemática do comportamento de ecossistemas naturais submetidos a interferências externas que destruam sua biodiversidade (consubstanciada em informação genética e outras) e causem a diminuição de suas resiliências. Tais perdas de informação teriam a forma de ganhos de entropia e, simetricamente, ao se regenerarem, estes ecossistemas perdem entropia.

Para se calcular o fluxo líquido de entropia descartado pela Terra ao espaço, vamos integrar a expressão  $dS = dQ/T$ , lembrando que  $T$  é a temperatura da fonte que cedeu a quantidade de calor  $dQ$  ao sistema. Note-se que esta temperatura não é necessariamente igual à do sistema que recebe o calor, mas pode ser igual à da parte (ou subsistema) deste, que esteja em contacto direto com a fonte de calor (Fermi, 1957). Assim, a energia solar que chega ao limite extremo da atmosfera a uma temperatura de 5.760 K degrada-se em diversos processos terrestres e é reemitida isotropicamente ao espaço à temperatura de 255 K.

Como a radiação incidente é direcional e a reemitida é isotropicamente distribuída, há uma relação de 4 entre os dois fluxos, de modo que a Terra descarta ao espaço um fluxo de entropia  $S = Q(1/T_{Terra} - 1/T_{sol})$ , onde  $Q = I_0/4 (1 - \alpha_T)$  é a quantidade de energia que chega à Terra e é reemitida ao espaço.

Aplicando-se agora os valores de  $I_0$  e  $T_{sol}$ , bem como o de  $T_{Terra}$  apresentados anteriormente, vê-se que, para se manter em estado de regime estacionário, a Terra descarta ao espaço (por  $m^2$  de sua superfície) um fluxo líquido de entropia igual a:

$$S = 1.367/4 \times (1 - 0,30) \times (1/255 - 1/5.760) = 0,899 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}. \quad (6)$$

Em sistemas em não-equilíbrio termodinâmico, a produção de entropia em processos diabáticos obedece a princípios variacionais de mínima ou de máxima produção de entropia, segundo as respectivas condições de fronteira e graus de liberdade.

Para sistemas próximos ao equilíbrio termodinâmico, Prigogine propôs, em 1962, o princípio da mínima produção de entropia (MinEP, do inglês *minimum entropy production*), pelo qual o estado estacionário é associado à mínima produção de entropia no interior do sistema (Juretić, 2005). Processos biológicos (fotossíntese, metabolismo e reprodução etc.), assim como processos econômicos (processos que ocorrem em sistemas industriais, agrícolas

e do setor de serviços) obedecem a este princípio. Em qualquer desses processos fica preservada a propriedade aditiva da entropia, acima lembrada.

Dissemos anteriormente que a entropia de um sistema é proporcional ao número de elementos que o compõe, por isso, quando se extrai do solo e se queima numa instalação industrial ou num automóvel um material que estava “organizado” em moléculas de fórmula geral  $C_nH_{2n+2}$  e outras igualmente “bem organizadas”, causa-se a sua “desorganização”, fragmentando-o e multiplicando-o em moléculas de gases de combustão e diversos particulados. Sendo o material queimado um hidrocarboneto que resultou da fossilização de resíduos de algas e outros organismos que se formaram por fotossíntese há centenas de milhões de anos, sua combustão contribui para aumentar a entropia da Terra de um valor equivalente ao da entropia que tinha sido **contida** há centenas de milhões de anos, quando se formaram por fotossíntese os organismos que deram origem ao material em causa. Por mínimo que seja este aumento de entropia, ele caminha no sentido oposto à sustentabilidade do planeta, ou de sua manutenção em estado estacionário.

O ciclo do combustível nuclear, que começa na mineração e concentração de óxido de urânio, passa pela conversão e o enriquecimento e vai até a liberação de energia de ligação de átomos de  $^{235}\text{U}$ , mediante a sua fissão ou fragmentação em elementos mais leves, também “desorganiza” matéria organizada, produzindo entropia.

Em outro contexto, isto também acontece quando se perde informação ao se destruir (ou “desorganizar”) a biodiversidade de um ecossistema natural, como foi visto acima.

Para sistemas longe do equilíbrio termodinâmico, Jaynes reformulou, em 1.957, os princípios da mecânica estatística dos sistemas em equilíbrio, nos quais se baseia a definição de entropia de Boltzmann e Gibbs, e estabeleceu os fundamentos da mecânica estatística para sistemas fora do equilíbrio, com muitos graus de liberdade e fronteiras livres (*Non-Equilibrium Statistical Mechanics – NESM*), de onde inferiu o princípio da máxima produção de entropia (*MaxEnt*). Embora ainda não exista uma demonstração formal deste princípio, sua validade é amplamente constatada de forma empírica (Dewar, 2.005). O transporte de calor dos trópicos para os pólos, por exemplo, é um processo com muitos graus de liberdade, sujeito a temperaturas que dependem de balanços energéticos locais, que por sua vez são afetados pela quantidade de calor transportada, o que gera um comportamento caótico, no qual o regime de estado estacionário implica a máxima produção de entropia.

\* \* \*

Dos fundamentos acima lembrados retenhamos que:

- A principal fonte de energia da Terra é o Sol, que é um reator a fusão nuclear contido numa “envoltória de contenção gravitacional”. Energia gravitacional não gera movimentos caóticos, portanto sua entropia é nula.
- A vida se mantém em função de gradientes que induzem a degradação de energia de alta qualidade. Esses gradientes existem porque a soma algébrica dos fluxos de entropia produzida nos subsistemas terrestres se mantém estável e a Terra libera entropia para o universo. Portanto, para que a vida se mantenha, a somatória das entropias dos diversos subsistemas da Terra não deve se afastar significativamente dos níveis atuais.
- A combustão de carvão e petróleo gera entropia, porque “desorganiza” matéria que estava fossilizada. Além disso, a atual concentração de CO<sub>2</sub> responde por cerca de 8 K a 9 K do aquecimento da atmosfera. Aumentos desta concentração intensificarão o efeito estufa e alterarão os gradientes que asseguram a vida no planeta.
- A entropia de um sistema depende do número de seus elementos e do conjunto de informações necessárias ao seu equilíbrio termodinâmico.

\* \* \*

Pode-se então definir desenvolvimento sustentável em função da intensidade dos impactos ambientais causados pelas atividades econômicas como aquele que tenda a manter próximas da atual, a somatória dos fluxos de produção de entropia dos sistemas terrestres, pois são estes que viabilizam a vida no planeta.

*Desenvolvimento sustentável é aquele que não contribui para afastar dos níveis atuais, a somatória dos fluxos de produção de entropia dos sistemas terrestres.*

Esta definição ainda não é precisa, entretanto, com base nela, poderíamos estabelecer de forma aproximada, porém lógica, escalas de magnitudes de impactos sobre o ambiente natural, provocados por atividades econômicas básicas.

Por enquanto estas escalas são limitadas pela escassez de trabalhos experimentais e pela insuficiência de dados quantitativos. Entretanto, na medida em que vá crescendo o interesse por este assunto, os pesquisadores em economia da energia e planejamento energético poderão definir escalas cada vez mais precisas, em função do que poderíamos chamar de *Graus Entrópicos* das atividades consideradas: entropias mais altas implicam maior “desordem”, portanto causam impactos mais intensos.

Assim, as fontes de energia que provocam impactos menores, devem receber *Graus Entrópicos* mais baixos.

Pode-se então ordenar as principais *cadeias de produção*, em função de *Graus Entrópicos* e da intensidade dos respectivos impactos ambientais.

Todas as cadeias de produção (industriais, agrícolas e do setor de serviços) consomem energia, portanto todas começam por uma fonte de energia primária:

Energia primária → Energia útil → Extração, transporte e processamento de matérias primas  
→ produção industrial → Transporte e distribuição de produtos acabados...

Vamos construir, tentativamente, uma tabela que ordena os ciclos de energia usados em atividades econômicas básicas, em função da intensidade de seus impactos ambientais.

Começando pela eletricidade, o ciclo parte, alternativamente, de uma fonte hidrelétrica, ou uma fóssil, ou uma eólica, ou uma fotossintética, ou uma nuclear. Essa tabela compreende o impacto entrópico resultante da exploração da fonte e da operação da usina elétrica. Por exemplo, a termelétrica nuclear considera também o impacto do ciclo do combustível nuclear, que começa consumindo derivados de petróleo na extração do minério de urânio, e assim por diante.

A atração gravitacional não gera movimentos caóticos, portanto não produz entropia. Como a energia hidrelétrica vem de massas de água atraídas ao centro da Terra pela atração gravitacional, é claro que esta fonte primária deve ser colocada na posição de mínimo Grau Entrópico (Grau 1). A tabela 2 apresenta um esboço desse tipo de ordenamento.

**Tabela 2 - Graus entrópicos de fontes de energia, numa escala de 1 a 10\***  
(Elaboração própria)

<b>FONTES DE ENERGIA</b>	<b>Graus entrópicos</b>	<b>Intensid. de impactos</b>
Combustíveis fósseis	10	
Biocombustíveis	5	
Energia nuclear	4	
Energia eólica	2	
Calor interno da Terra	1	
Radiações solares	1	
Gravitacionais **	1	



\*De acordo com a forma de exploração, intercalam-se outros graus. \*\* Usinas hidrelétricas e maré-motrizes.

Seja então um conjunto de alternativas para se converter energia primária em energia elétrica: usinas hidrelétricas, termelétricas convencionais, nucleares, eólicas, termelétricas a biomassa, etc. Suponhamos que o investimento a ser realizado para se atingir o objetivo (oferecer eletricidade aos consumidores) será decidido a favor da alternativa que

causará mínimo impacto, o que equivale a dizer menor desordem no meio ambiente, ou mínimo aumento de entropia.

Qualquer que seja a fonte primária escolhida, o processo é igualmente entrópico a partir do grupo turbo-gerador, portanto a nossa decisão preliminar deverá ser a favor da fonte primária de menor *Grau Entrópico*, com a ressalva de que a decisão final seja precedida de uma análise de questões ligadas à disponibilidade da fonte escolhida, a problemas sociais causados pela construção da barragem e pela inundação provocada, etc.

Quando houver suficientes estudos multidisciplinares sobre o assunto, tabelas semelhantes poderão ser organizadas em bases mais quantitativas, para finalidades tais como produzir alimentos; operar redes de transporte; iluminar e climatizar ambientes; gerar calor de processo e assim por diante.

Se admitirmos que esses processos ocorram sob pressão e temperatura constantes (pressão atmosférica e temperatura média do local), suas contribuições para o aumento da entropia podem ser estimadas de forma aproximada, a partir da relação entre o primeiro e o segundo princípios da termodinâmica, expressa na relação  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , onde  $\Delta G$  é a variação da energia livre de Gibbs e  $\Delta H$  é a variação de entalpia nos processos em questão.

Tais variações podem ser medidas experimentalmente, o que permite calcular a variação da entropia por meio da relação  $\Delta S = \Delta H/T$ .

Numa etapa posterior, seria possível matizarem-se alternativas ao mesmo projeto, em função das possíveis formas de exploração e respectivos graus entrópicos.

Tomemos como exemplo os combustíveis de biomassa que, como será mostrado no item 5.2.3, são menos entrópicos do que os derivados de petróleo.

Esta afirmação deve ser contextualizada. De fato, o principal biocombustível atualmente em uso (etanol) é obtido por fermentação de biomassa vegetal num processo que utiliza enzimas para desencadear as reações, mas há uma nova geração de biocombustíveis em desenvolvimento nos Estados Unidos, obtidos por meio de reações catalíticas, a temperaturas bem mais altas do que os processos fermentativos. Estes biocombustíveis são mais densos em energia do que o etanol e abrem a perspectiva de que grande parte da demanda por derivados de petróleo naquele país venha a ser substituída por combustíveis renováveis (US Department of Energy, 2005). Esperam os americanos que esses biocombustíveis estejam prontos para licenciamento em 2011. Sua produção é mais eficiente - e seu impacto entrópico será menor do que o do etanol. Quando tais combustíveis estiverem em condições de uso, será possível estabelecer um ordenamento por grau entrópico, em função dos métodos de plantio e dos produtos e técnicas usadas nas plantações de base para esses combustíveis.

Poder-se-á, então, ordenar produtos, projetos, e equipamentos de mesma finalidade, em função de seus impactos entrópicos, dependendo da forma de energia que usem. Por exemplo, automóveis podem ser alimentados a etanol obtido por fermentação de cana de açúcar, ou por “gasolina verde” produzida a partir de biomassas vegetais, com o emprego de catalizadores, causando maior ou menor impacto entrópico. Por enquanto isto é muito limitado pela falta de dados quantitativos (Ruth, M. 2005) e, evidentemente, há ainda muito trabalho interdisciplinar a ser feito, reunindo esforços de P&D nos campos das ciências agrícolas, engenharias química, mecânica e elétrica; ecologia, economia, ciências sociais, etc.

Outro exemplo seria dado pela comparação entre edifícios tradicionais, climatizados e iluminados por sistemas “electricity intensive” – e edifícios projetados e construídos com base em projetos arquitetônicos bioclimáticos.

Mais um exemplo seria o de uma cidade caótica e congestionada, comparada com uma conurbação bem organizada.

\* \* \*

A produção de entropia poderá servir de balizamento para a gradativa reestruturação dos sistemas produtivos, a fim de que a economia, como um todo, vá aos poucos se aproximando da sustentabilidade. Mas ainda é preciso investir muito em estudos teóricos e pesquisas de campo, para formar a base de dados necessária para avaliar a produção de entropia das diversas atividades econômicas.

Entretanto, a produção de entropia causada pelo uso de diversas fontes de energia pode ser estimada de forma aproximada, seguindo um ordenamento preliminar como o esboçado na tabela 2.

Não se pode esperar que o mercado, sem forte controle estatal, crie condições para que a oferta de energia e a demanda da economia respeitem a uma política energético-industrial integrada, que conduza a um *decoupling* entre o crescimento econômico e o uso dos recursos naturais (van der Voet, E. *et al*, 2005).

Este *decoupling* seria indispensável para que a produção ficasse limitada não apenas pelas reservas de recursos naturais, mas também pela capacidade do meio ambiente ir reconstituindo os recursos naturais e reciclando os rejeitos gerados.

Dissemos anteriormente que os atuais modelos de desenvolvimento se baseiam no crescimento ilimitado e apresentam a grave falha de desvincularem o rendimento do trabalho, da produtividade da economia, provocando a desigualdade de rendimentos e a necessidade de se emprestar dinheiro e inflacionar o mercado financeiro para criar demanda. Uma

consequência disto foi a proliferação dos ativos financeiros, que provocou a atual crise econômica global.

De fato, “O estoque financeiro mundial - o total de depósitos bancários, títulos de dívida privada, dívidas governamentais e participações acionárias - passou de US\$10 trilhões em 1980 (próximo do valor do PIB mundial da época), para US\$167 trilhões em 2006 (quase quatro vezes o PIB mundial de hoje). Apenas em 2006, os ativos financeiros globais tiveram um aumento de US\$25 trilhões, ou quase 18% (um crescimento três vezes maior que o do PIB), liderados por aumentos nos ativos dos Estados Unidos (US\$5,7 trilhões) e China (US\$2,8 trilhões). Apenas as reservas de divisas dos governos passaram de US\$ 910 bilhões, em 1990, para US\$5 trilhões em 2006. Este aumento acelerado faz parte da globalização financeira. Os ativos internacionais dos bancos subiram de US\$ 6 trilhões, em 1990, para US\$37 trilhões em 2007, o equivalente a mais de 70% do PIB mundial, gerando um processo insustentável para o próprio sistema financeiro.” (Instituto Fernand Braudel, 2008).

A propósito disso, há quase 30 anos os ecologistas Howard e Elisabeth Odum escreveram: “Os empresários e banqueiros precisam reconhecer que o capitalismo em grande escala, no qual o dinheiro é sempre capaz de gerar mais dinheiro, só existe quando a oferta de energia pode ser expandida, mas desaparece quando se chega a um estado de equilíbrio” (Odum, 1.981).

O desatrelamento (*decoupling*) entre crescimento econômico e uso dos recursos naturais pressupõe o estabelecimento de contabilidades nacionais agregadas de fluxos de insumos (e detritos) usados (e gerados) não somente nos processos produtivos, mas também no consumo e deposição final dos rejeitos. Estas contabilidades de fluxos materiais (Material Flow Account) baseiam-se nas massas de *inputs* e *outputs* físicos dos processos produtivos (Bringezu, 2004).

Os materiais de maior impacto entrópico entram no fluxo com peso maior. Por exemplo, o impacto de um quilograma de alumínio é bem maior do que o de um quilograma de madeira. Naturalmente, a etapa final desses fluxos compreende o consumo dos produtos acabados e a deposição final dos rejeitos gerados.

Em suma, a efetiva compatibilização do crescimento de uso dos recursos naturais, com a capacidade do ambiente de renová-lo e de reciclar os rejeitos é uma condição essencial para a sustentabilidade. “A liderança mundial dos próximos anos não estará nas mãos dos países que vão crescer mais, mas sim daqueles que conseguirem vencer a pobreza e reduzir a desigualdade modificando o conteúdo material e energético da vida econômica. Deduz-se daí que o caminho correto para um futuro sustentável está na transição para sistemas produtivos

que preservem o patrimônio natural, se apóiem no consumo cada vez menor de matéria e energia e valorizem a biodiversidade, não o mimetismo de acreditar que petróleo, biocombustíveis para motores a combustão interna e grandes obras para exportação formam o caminho do futuro” (Abramovay, 2009).

Nesse contexto, o Produto Interno Bruto (PIB) ficaria obsoleto, devendo ser substituído por um índice para medir a produção física de bens e serviços, afetado positiva ou negativamente por parâmetros ligados à sustentabilidade e à qualidade de vida. Ter-se-ia, então, um Índice Desenvolvimento Humano Sustentável (IDHS), que seria função direta de índice semelhante ao IDH (do PNUD), e de parâmetros para avaliação da sustentabilidade ambiental, que seriam estabelecidos em função dos graus entrópicos dos produtos de maior peso na produção da economia. Esses parâmetros seriam agregados na forma de um *Índice de Sustentabilidade Ambiental – ISA*.

O IDHS de um país seria, portanto, uma função de seus índices IDH e ISA, isto é:

$$\text{IDHS} = f(\text{IDH}, \text{ISA})$$



#### 4 O PRINCÍPIO DA PRECAUÇÃO

O primeiro sistema construído em Roma para desviar as águas das chuvas, drenar brejos e evitar desmoronamentos baseou-se na tradição da engenharia etrusca e foi implantado entre 800 e 735 antes de Cristo. No século VI a.C., com a finalidade de amenizar os maus odores, o sistema foi ampliado pela construção da Cloaca Máxima, canalizando os dejetos da cidade para o Tibre e infectando águas que eram bebidas pela população (Hopkins, J.N.N., 2007).

Em 312 a.C. Ápio Cláudio resolveu o problema mediante a construção do primeiro aqueduto para abastecer Roma com água limpa, captada em nascentes nas montanhas (Montanelli, 1969).

Dois mil anos depois (1.854) uma epidemia de cólera ameaçava a população londrina e um cidadão de nome John Snow suspeitou que o foco pudesse estar na bomba pública de água da Broad Street e – mesmo sem evidência científica de que aquela era a origem do problema, pois o fato ocorreu antes dos trabalhos de Pasteur – tomou a iniciativa de interromper o funcionamento da bomba, evitando a propagação da epidemia (Bourg e Schlegel, 2.001).

No primeiro caso evitaram-se desmoronamentos e reduziu-se a incidência de enterites e, no segundo, impediu-se a propagação do cólera. Contudo, não se pode dizer que tenha havido ações precautórias, pois, tanto as enchentes e desmoronamentos na Roma antiga, como o *vibrio cholerae*, na Londres do século XIX, já vinham fazendo vítimas.

O dogma de que a ciência era infalível e o *homo scientificus* dominaria o clima e as doenças atrasou consideravelmente a formalização jurídica do princípio da precaução.

Suas premissas só se consolidaram na década de 1.970, em três dispositivos da legislação ambiental alemã: o princípio da prevenção (*Vorsorgeprinzip*), o princípio do poluidor-pagador ou princípio da responsabilização (*Verursacherprinzip*) e o princípio da cooperação ou da participação (*Kooperationsprinzip*), que têm o objetivo de estimular as empresas a tomarem medidas concretas para evitar a poluição, antes mesmo de se comprovarem cientificamente os danos que possam ser causados ao meio ambiente (Bourg e Schlegel, *op cit*).

Na declaração conclusiva da Conferência Internacional sobre a Proteção do Mar do Norte, realizada em Londres em novembro de 1.987, foi acordado que, para proteger aquela região dos efeitos de substâncias potencialmente prejudiciais, tornava-se necessária uma abordagem de precaução, que poderia exigir a adoção de medidas destinadas a limitar o

aporte de determinadas substâncias, antes mesmo de que se comprovasse cientificamente uma relação de causa e efeito (Bourg e Schlegel, *op. cit.*).

Explicitava-se assim a intenção dos signatários daquela declaração de aceitar o princípio da precaução como elemento fundamental de suas políticas de proteção ao meio ambiente.

Em 1992, na declaração conclusiva da Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente, no Rio de Janeiro, o princípio da precaução foi definido como uma garantia contra riscos potenciais que, de acordo com o estado atual do conhecimento científico-tecnológico, ainda não podiam ser identificados. Tais riscos seriam definidos a partir de estudos de impacto ambiental a serem realizados na fase de planejamento de investimentos que pudessem causar danos significativos – irreversíveis ou não – ao meio ambiente, como está explicitado nos princípios 15 e 17 daquela declaração:

- *Princípio 15: A fim de proteger o meio ambiente, o princípio da precaução deve ser amplamente observado pelos Estados, de acordo com suas capacidades. Quando houver ameaça de danos sérios ou irreversíveis, a ausência de absoluta certeza científica não deve ser utilizada como razão para postergar medidas eficazes e economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental.*
- *Princípio 17: A avaliação do impacto ambiental, como instrumento internacional, deve ser empreendida para as atividades planejadas que possam vir a ter impacto negativo considerável sobre o meio ambiente, e que dependam de uma decisão de autoridade nacional competente.*

A Constituição Brasileira de 1988 não faz distinção entre prevenção e precaução, utilizando os dois termos praticamente como sinônimos. A anteriormente à declaração do Rio de Janeiro, preponderava o termo prevenção.

Na definição do princípio da precaução os dois termos devem ser diferenciados, adotando-se a **prevenção** quando se proíbe determinada ação porque se sabe quais serão as consequências de praticá-la, prosseguir com ela ou suprimi-la. O nexos causal é cientificamente comprovado e decorre muitas vezes até da lógica. Evita-se o dano ambiental através da prevenção no tempo certo.

Enquanto isso, pelo princípio da **precaução**, tomam-se determinadas medidas restritivas quando, devido a incertezas científicas, não é possível prever as consequências que determinado ato ou empreendimento ou inovação científica causará ao meio ambiente no espaço ou no tempo. Na ausência da certeza científica formal baseada nos conhecimentos científicos e técnicos do momento, a simples existência de uma possibilidade de risco de dano

sério ou irreversível ao meio ambiente (e à saúde pública) exige que se implementem medidas restritivas, para evitar que o dano se concretize (Leme Machado, 2001).

Assim, a **precaução** deve estar presente para impedir o prejuízo ambiental, mesmo incerto, que possa resultar das ações ou omissões humanas, e deve também servir para a prevenção oportuna desse prejuízo.

Trata-se, portanto, da antecipação de medidas destinadas a evitar futuros prejuízos, ainda que incertos (Bessa Antunes, 2004).

O princípio da precaução implica a idéia da inversão do ônus da prova, em favor do meio ambiente, ou seja, “os empreendedores de um projeto devem necessariamente implementar medidas de proteção ao meio ambiente, salvo se trouxerem a prova de que os limites de risco e de incerteza não serão ultrapassados” (Leme Machado, *op.cit*).

Colocado dessa forma, o princípio da precaução deve constituir um referencial para aferir e atestar a validade de leis, deixando no terreno da ilegalidade regulamentos e normas que contrariem o referido princípio, bem como atos baseados nesses regulamentos e normas.

Diferentemente do que se verifica em outras áreas do direito, na esfera ambiental deve vigorar a responsabilidade civil objetiva, que foi inserida pelo artigo 14 da Lei de Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 9391/81) e reconhecida no § 3º do artigo 225 da Constituição Federal: "O poluidor é obrigado, independentemente da existência da culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros afetados por esta atividade."

Pelos tratados internacionais, o princípio da precaução (ou qualquer outro princípio) só vigora depois de se tornar obrigatório à luz das legislações internas dos países signatários. A Convenção da Diversidade Biológica e a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, que foram assinadas pelo Brasil e ratificadas pelo Senado brasileiro, incluem o princípio da precaução e estabelecem que o mesmo visa à redução dos danos ambientais, sem que seja necessário demonstrar a certeza científica da probabilidade do dano, para que sejam tomadas medidas cabíveis destinadas à solução, ou à minimização do problema.

A Convenção de Paris para a Proteção do Meio Marinho do Atlântico Nordeste, celebrada em 1992 (Convenção de Paris, 1.992), obriga a que “... medidas de prevenção devem ser tomadas quando existam motivos razoáveis de se inquietar do fato de a introdução, no meio marinho, de substância ou energia, direta ou individualmente, poder acarretar riscos para a saúde humana, prejuízo aos recursos biológicos e aos ecossistemas marinhos, representar atentado contra os valores de lazer, ou entravar outras utilizações legítimas do

mar, mesmo que não existam provas indicando relação de causalidade entre as causas e efeitos”.

Em 1986, o sentimento de insegurança provocado na Europa pela doença de Creutzfeldt-Jacob (doença da “vaca louca”) levou os governos britânico e de outros países a apelar para a medida extrema de abater rebanhos inteiros, sempre que se constatava que apenas um único animal estava contaminado. Em seguida, na França, a inquietude causada pela notícia de que se tinham feito transfusões com sangue contaminado de vírus da Aids, levou o governo a adotar medidas preventivas concretas, especialmente através da Lei nº 95-101, de 1995 (Lei Barnier), que introduz o princípio da precaução, segundo o qual, tendo-se em conta os conhecimentos científicos do momento, a ausência de certeza não deve retardar a adoção de efetivas medidas visando a prevenir riscos de danos graves e irreversíveis, a um custo economicamente aceitável (Bourg e Schlegel, *op. cit.*).

O Princípio da Precaução não deve ser encarado como um obstáculo a atividades pioneiras, principalmente no campo da pesquisa científica, mas sim como uma forma de se resguardarem os interesses da sociedade como um todo, e de cada pessoa, em particular (Goldim, 2002). Trata-se de um princípio fundamental para a abordagem de questões tão atuais e importantes como, entre outras, a produção de alimentos transgênicos, a clonagem de seres humanos, a injeção, em depósitos subterrâneos, de emissões de CO<sub>2</sub> de termelétricas a carvão e as monoculturas energéticas de larga escala. Reconhecer a possibilidade da ocorrência de danos e a necessidade de sua avaliação com base nos conhecimentos já disponíveis é o grande desafio que está diante da comunidade científica mundial.

\* \* \*

À luz do Princípio da Precaução, fica estéril a polêmica travada entre aqueles que atribuem a elevação da temperatura média da biosfera exclusivamente a variações da atividade solar, que aumentam a quantidade de calor recebida pela Terra – e aqueles que atribuem apenas a fatores antropogênicos em particular pelo emprego de combustíveis fósseis.

De fato, estudos da irradiação solar mostram que sua variação, nos últimos 2.000 anos, inseriu-se numa faixa entre apenas 0,1% e 0,6%. Esta variação não traduz um aumento sistemático, pois a irradiação solar aumenta e diminui ciclicamente e a variação mede a diferença entre o máximo e o mínimo observados no período considerado. Seu pico tende a coincidir com o pico do ciclo solar, que tem uma duração média de 11 anos, sendo um de seus indicadores o número de manchas que aparecem na superfície do Sol. Quanto mais ativo é este, maior é o número de manchas.

Modelos de variação climática causadas por anomalias solares usam variações na irradiação solar de 0,25%, mas o valor médio é de apenas 0,1%, de acordo com dados fornecidos por entidades como a NASA e a Agência Espacial Europeia, que monitoram o comportamento do Sol. Portanto é pouco provável que a variabilidade solar seja um fator preponderante no aquecimento global.

Ainda menos importante seria um possível impacto de outros tipos de radiações solares, tais como as ultravioletas e os raios cósmicos (Foukal, 2.006).

Não há nenhuma indicação precisa a respeito da real influência da variabilidade solar sobre a temperatura da Terra, mesmo assim alguns pesquisadores acreditam que é maior do que a influência de atividades humanas.

Embora o problema da temperatura da atmosfera só tenha chegado recentemente aos foros políticos, econômicos e diplomáticos, a verdade é que já vinha sendo estudado por cientistas importantes há quase dois séculos.

O matemático francês Joseph Fourier, por exemplo, escreveu em 1824 um trabalho intitulado *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires* (Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, 1.824), no qual afirmou que “a temperatura (da Terra) aumenta porque o calor encontra menos obstáculos para penetrar no ar na forma de luz, do que para sair, depois da conversão (da luz) em calor obscuro” (Philibert, 1990).

O físico alemão Heinrich Hertz também abordou o assunto, numa aula inaugural que proferiu em 20 de abril de 1.885, na Technische Hochschule Karlsruhe (atual Universidade de Karlsruhe), intitulada “Über den Energiehaushalt der Erde” (Mulligan, J.F.; Herz, H.G, 1.977).

Outro trabalho pioneiro foi publicado em 1.896, pelo químico sueco Svante Arrhenius (ganhador do Prêmio Nobel de 1.903), sob o título de "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground" (Arrhenius, 1896). O ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ) é formado pela diluição de gás carbônico em água:  $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$ , e Arrhenius referia-se à solução de  $CO_2$  em vapor d'água, contido na atmosfera.

A influência do aumento da concentração de  $CO_2$  e outros gases de estufa sobre o clima terrestre é experimentalmente comprovada por meio da análise de amostras de gelo extraídas a grandes profundidades nas regiões polares.

Desde que o escritório de Meteorologia do Reino Unido começou a fazer medidas da temperatura atmosférica, constatou-se que o primeiro semestre de 2.002 foi o mais quente desse período. Dados cada vez mais abrangentes e precisos, levantados nos últimos 150 anos,

indicam uma correlação entre as crescentes emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do uso de combustíveis fósseis e o aumento da temperatura média da biosfera.

A correlação entre o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e a elevação da temperatura da biosfera ficou mais nítida nas últimas quatro décadas, como ilustra a tabela 3, na qual o ponto inicial (aumento nulo) foi colocado no ano de 1.960.

**Tabela 3** - Concentração de CO<sub>2</sub> e acréscimos da temperatura média da atmosfera.

Ano	Concentração de CO <sub>2</sub> (em ppm, base volum.)	Aumento da temperatura da biosfera (° C)
1.960	315	0,00
1.970	325	0,05
1.980	335	0,00
1.990	352	0,10
2.000	368	0,60

Fontes: M. Loa Observatory, NOAA – USA e Gribbin, 2.002 p. 17

Uma consequência do aquecimento da atmosfera que parece ser de consenso entre os climatologistas é a de que o ar próximo à superfície marinha se aquece, provocando o derretimento da camada de gelo sobre o mar e sobre o continente. Com isso, parte da energia térmica armazenada no Oceano Atlântico (que também está mais quente) é transferida para o norte. Esse fenômeno tem causado a diminuição da camada de gelo em toda a Região Ártica, com números que, nos últimos verões, chegaram aos maiores valores já registrados. Tais alterações também exercem influência sobre o ciclo do carbono, pois, com o aquecimento, a matéria orgânica – que foi acumulada e congelada por milênios no solo ártico – libera metano para a atmosfera, aquecendo-a ainda mais. Com isso, toda a região, que era coberta de gelo, vai ficando exposta antes do esperado para o início do verão ártico, e ficando sem gelo até depois de seu fim. O impacto dessas mudanças sobre a tundra ártica (vegetação rasteira, alimentada basicamente pela água do degelo) traduz-se na proliferação de uma vegetação do tipo arbustivo na região (Kolbert, 2006).

Ao lado de tudo isso, a elevação da temperatura do ar aumenta o risco de incêndios na floresta boreal, com o consequente impacto adicional sobre o ciclo do carbono.

\* \* \*

Diante das crescentes dificuldades geológicas, geopolíticas e econômicas ligadas à exploração de petróleo e gás natural, e considerando que a sobrevivência da “moderna civilização” humana depende de basicamente desses combustíveis (Ver capítulo 1), mesmo que as emissões de CO<sub>2</sub> devidas ao seu uso não sejam a causa fundamental do efeito estufa,

não é prudente aguardar que a situação fique insustentável, para só então estudar e propor um plano voltado para a gradativa substituição do petróleo, combustíveis, por combustíveis renováveis e limpos.

Por outro lado, deixando de lado a polêmica entre aqueles que atribuem o aumento da temperatura média da atmosfera a variações das manchas solares, e aqueles que o atribuem a impactos antropogênicos, é certo que, sobre as manchas solares, a humanidade não pode influir, mas pode fazê-lo em relação aos impactos antropogênicos.

As conseqüências sociais e econômicas dos impactos causados pelo aquecimento da atmosfera podem ser devastadoras e o único meio ao alcance da sociedade para evitar a catástrofe é desenvolver um modelo econômico apoiado em matriz energética livre de combustíveis fósseis, na qual as fontes de energia devem ser renováveis e não devem contribuir para alterar significativamente o balanço de CO<sub>2</sub> na atmosfera. O desenvolvimento de tal modelo é, ao mesmo tempo, um problema técnico-científico, ético, político e econômico, daí a importância de se aplicar o princípio da precaução no processo de escolha das fontes de energia que darão forma a esse modelo, até que se defina um modelo baseado em conhecimentos técnicos e científicos mais abrangentes.

Entre as principais fontes renováveis de energia estão os combustíveis fotossintéticos, cuja produção requer solos adequados. Ocorre que os solos se comportam como se fossem organismos vivos. Sua fertilidade depende de processos ligados à vida de diversas comunidades de organismos, numa camada superficial que raramente passa de 30 centímetros de espessura. Essa camada é formada pela decomposição de matéria orgânica em solo úmido, ao longo dos séculos, vai se depositando na superfície e repondo o material levado pela erosão natural, que ocorre mesmo em áreas originalmente florestadas ou cobertas de prados. Este processo é acelerado em áreas em que a vegetação natural é substituída pelas monoculturas de ciclo curto e reflorestamentos industriais. A reconstituição da camada fértil do solo é muito lenta. Dependendo, entre outros fatores, do relevo e das características geológicas do terreno, estima-se que sejam necessários cerca de 200 anos para se reconstituir uma camada de apenas 1 centímetro de espessura. Se a erosão for mais rápida do que a reposição, diz-se que o **Fator de Tolerância** foi ultrapassado. Obedecendo ao **princípio da precaução**, os solos devem ser explorados em rodízio, com rotações cíclicas a intervalos temporais suficientes para que se preserve a camada superficial de húmus. Outro aspecto a ser considerado com vistas à sustentabilidade é a necessidade de se manterem talhões florestais, margeando as plantações e nelas intercalados. As florestas são indispensáveis para a estabilização da umidade

atmosférica, para o regime pluviométrico e, portanto, para a regularidade de todo o ciclo hidrológico.

Igualmente importante será a imediata reestruturação de sistemas tais como o dos transportes e a reformulação de modelos de exploração agrícola intensiva e outros, que provocam impactos mensuráveis sobre o equilíbrio ecológico do planeta.

No item 9.2 e no Apêndice B, procuramos indentificar casos específicos em que o apelo ao princípio da precaução deveria ser objeto de um rigoroso exame.

A seguir são apresentadas as fontes de energia disponíveis no Brasil, com foco nas renováveis.



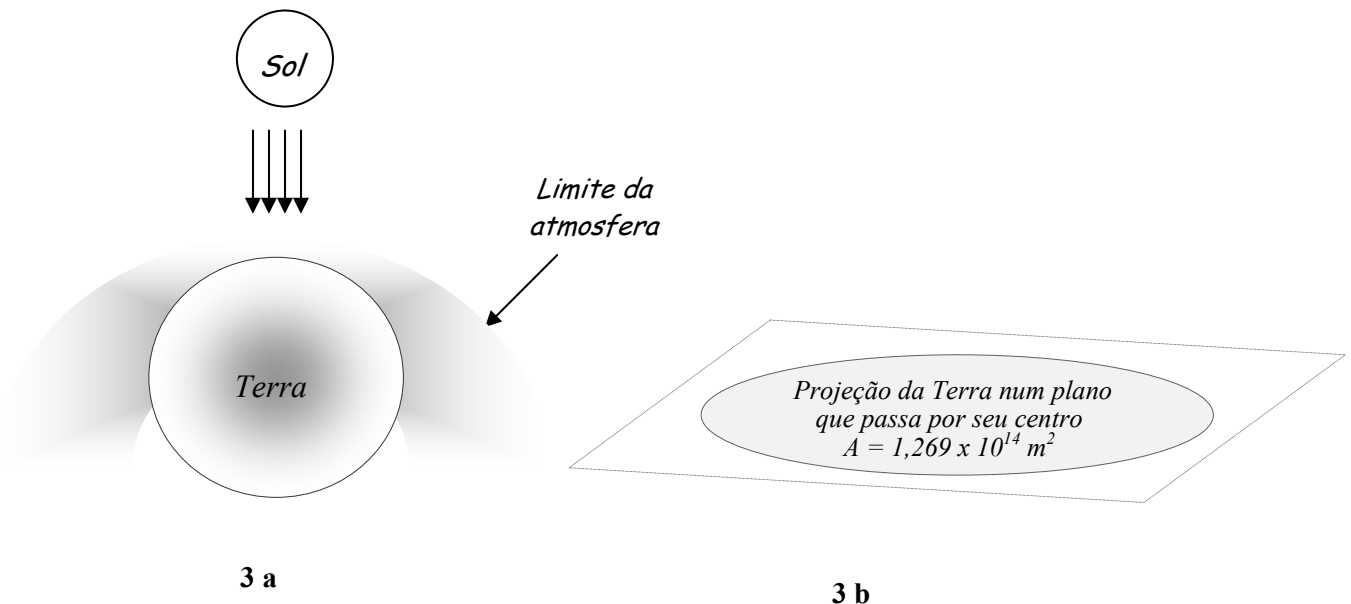
## 5 FONTES DE ENERGIA

A principal fonte de energia da Terra são fótons de alta energia produzidos por reações de fusão nuclear que ocorrem no Sol, de onde são emitidos isotropicamente para o espaço, numa larga faixa de comprimentos de onda (Wieder, 1.982, pp. 19 a37).

Nos limites extremos da atmosfera, as radiações solares chegam em fluxo direcional à órbita terrestre, incidindo sobre uma superfície normal a sua direção com uma potência da ordem de  $1,367 \text{ kW/m}^2$  (constante solar). Portanto, 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, pelo número de horas do ano, como ilustra a figura 1 (Carvalho, 2.006):

$$Q = 1,367 \text{ kW/m}^2 \times 1,269 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 8766 \text{ h/ano} = 1,5 \times 10^{18} \text{ kWh/ano.}$$

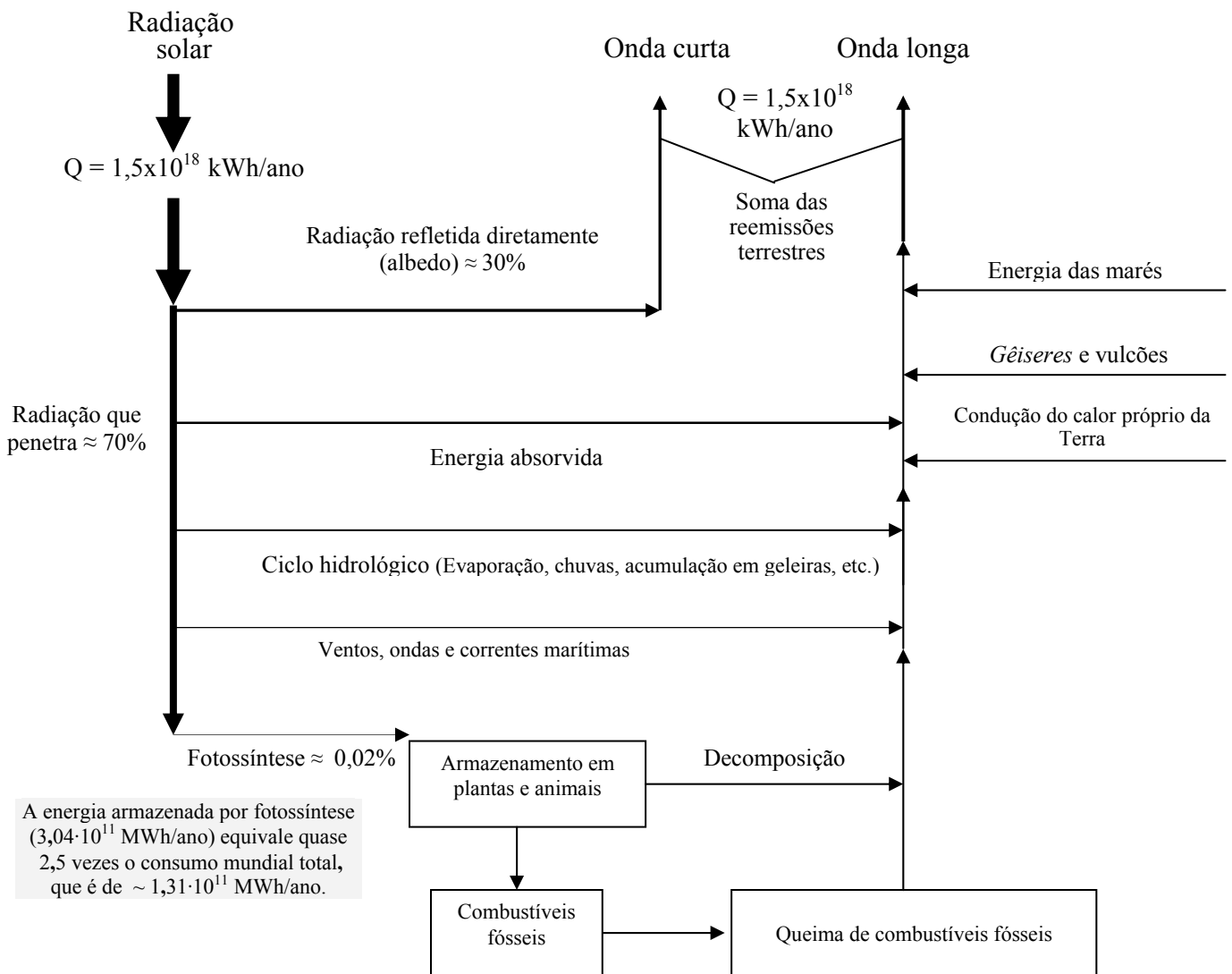
Esta energia apresenta-se sob a forma de radiação eletromagnética, numa faixa de comprimentos de onda que vai desde os raios-X até as ondas de rádio, preponderando uma faixa mais estreita, entre o ultravioleta ( $\sim 0,20\mu\text{m}$  a  $0,30\mu\text{m}$ ) e o infravermelho ( $\sim 2,0\mu\text{m}$  a  $2,5\mu\text{m}$ ). A luz visível ( $\sim 0,38\mu\text{m}$  a  $0,75\mu\text{m}$ ) fica entre ambas e corresponde a cerca de 50% do espectro incidente na Terra.



**Figura 3 Energia solar incidente sobre a Terra**

Do total que incide direcionalmente sobre a Terra, 30% são refletidos (albedo) pela camada extrema da atmosfera, sob a forma de radiações de onda curta, que compõem as franjas ultravioleta, violeta e azul do espectro.

Dos 70% restantes, pouco mais de 46% são absorvidos na superfície terrestre, degradando-se em calor à temperatura superficial dos continentes e oceanos. A energia degradada é reemitida isotropicamente pela Terra na forma de radiação de onda longa (faixa infravermelha), a frequências muito menores do que a radiação incidente (V. figura 4). Como alguns gases da atmosfera (gás carbônico, vapor de água, etc), são semi-opacos às radiações infravermelhas, este fenômeno gera o efeito estufa, que mantém a temperatura média da atmosfera em torno de 15°C, possibilitando, entre outras coisas, a vida como a conhecemos.



**Figura 4 Caminhos da energia incidente, até sua reemissão ao espaço**

Aumentos anormais da concentração dos gases causadores do efeito estufa podem elevar a temperatura da atmosfera a níveis incompatíveis com a vida humana.

Aproximadamente 23% das radiações incidentes respondem pelo ciclo hidrológico (evaporação das águas e fenômenos de convecção, formação de nuvens, chuvas, nevascas, acumulação em geleiras, lagos e rios, etc.) e também acabam reemitidos na faixa térmica.

Uma pequena parte (cerca de 0,15%) dá origem às ondas e aos ventos. Por fotossíntese, nas plantas, armazena-se 0,02% do total, ou seja,  $3,04 \cdot 10^{11}$  MWh/ano, o que equivale a quase 2,5 vezes o consumo anual de energia no mundo, o qual, somando-se todas as fontes, é da ordem de  $1,31 \cdot 10^{11}$  MWh/ano (AIE, 2.006).

A contribuição da energia própria da Terra (vulcões, gêiseres e calor do magma conduzido em rochas), em conjunto com a energia das marés (que tem origem na atração gravitacional exercida principalmente pela Lua sobre a Terra), equivale a apenas 0,018% da energia recebida do sol.

A energia solar que chega à Terra – somada ao 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 da própria da Terra, de sorte que o total incidente equivale à soma das energias reemitidas, equilibrando o balanço, como ilustra a figura 4.

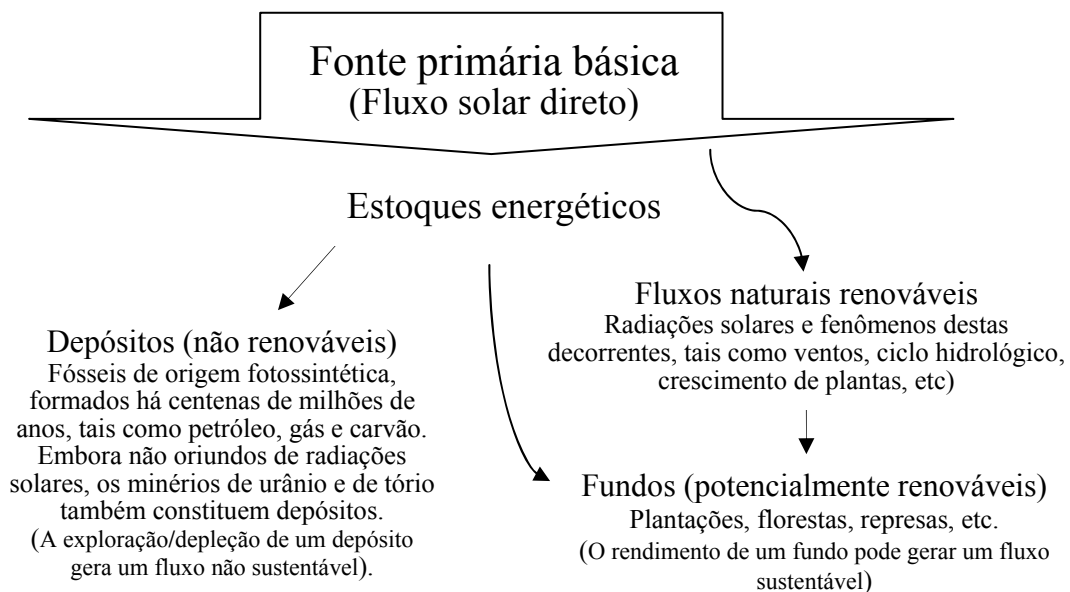
## 5.1 Fluxos, estoques, depósitos e fundos de energia

No item acima foi mostrado que a energia disponível para uso pela sociedade provém, direta ou indiretamente, do fluxo solar. Apenas uma pequena parte vem dos gêisers, dos vulcões e do calor interno da Terra e, ainda, das marés. O calor interno da Terra tem origem na radiatividade natural de elementos tais como o urânio, o tório e o potássio. E a energia das marés vem da atração gravitacional exercida sobre a Terra, principalmente pela Lua.

Os combustíveis fósseis derivam de processos fotossintéticos ocorridos há centenas de milhões de anos, sendo, portanto, **não renováveis** na escala temporal humana. Os combustíveis de biomassa, por terem origem em processos fotossintéticos recentes, são **renováveis** na escala temporal humana.

O ciclo hidrológico, que é movido por energia solar (V. figura 2), pode ser aproveitado em usinas hidrelétricas, para gerar eletricidade de forma renovável.

A figura 5 esquematiza um modelo de classificação das diversas fontes de energia empregadas pela sociedade, em estoques, depósitos e fluxos.



**Figura 5 Fontes, fluxos, estoques, depósitos e fundos de energia**

Os estoques energéticos englobam depósitos e fundos. A exploração dos depósitos gera fluxos que se extinguem quando o depósito se esgota. Os fundos podem gerar fluxos sustentáveis, desde que sua exploração não seja predatória.

Evidentemente, o fluxo solar pode ser aproveitado de forma direta, por exemplo em sistemas fotovoltaicos e coletores termosolares.

## 5.2 Fundos de energia - fontes renováveis

Como foi dito, as fontes renováveis de energia constituem fundos alimentados pelo fluxo solar. À semelhança de fundos financeiros, os fundos energéticos podem gerar fluxos sustentáveis, desde que sua exploração não seja predatória.

Fontes renováveis como o potencial hidrelétrico e as biomassas já entram com algo em torno de 46% na matriz energética brasileira (EPE, BEN, 2.006). Em médio prazo, o potencial eólico também deverá ter uma participação relevante.

O fluxo solar também pode ser aproveitado diretamente, por exemplo, em coletores termossolares e sistema fotovoltaicos.

Países como Alemanha, França, Espanha e Japão fazem atualmente importantes investimentos, com vista ao desenvolvimento de células fotovoltaicas mais eficientes. Embora esta fonte renovável seja muito promissora para o Brasil, o presente trabalho não focalizará especialmente o tema, a não ser pela possível entrada, gradativa, de sistemas termosolares e fotovoltaicos, em sistemas isolados.

As diversas fontes renováveis, para a geração de energia elétrica, cuja exploração seja técnica e economicamente viável em médio prazo foram consideradas no cenário sustentável proposto nesta tese para o ano 2.030.

A principal é, naturalmente, potencial hidrelétrico, integrado num sistema hidro-eólico-térmico, aproveitando as sinergias dos regimes pluviométricos nas diferentes bacias hidrográfica, com o regime eólico e as safras de cana de açúcar, já que, neste sistema, as termelétricas serão preponderantemente a bagaço de cana.

Para o suprimento de combustíveis, as principais fontes serão a cana de açúcar e as plantas oleaginosas.

No item 9.2 estão apresentadas em detalhe as fontes primárias viáveis em médio prazo, para a produção de energia elétrica e combustíveis.

### 5.2.1 O potencial hidrelétrico

O ciclo hidrológico (evaporação, formação de nuvens, precipitações de chuvas, nevascas, geadas, etc.) absorve cerca de 23% da energia solar que incide na Terra (Mulligan, 1980, p. 327). Estas precipitações são em parte captadas pelos rios, formando bacias hidrográficas, nas quais os fluxos provenientes de regiões mais elevadas são naturalmente conduzidos ao mar, pela ação da gravidade. O represamento desses fluxos em reservatórios convenientemente localizados permite que se acumule uma fração do potencial do ciclo hidrológico, de forma pouco agressiva ao meio ambiente.

Há grupos ambientalistas que se opõem radicalmente ao aproveitamento desse potencial. Um argumento freqüentemente por esses grupos é o de que “as usinas hidrelétricas emitem mais gases de estufa do que termelétricas a gás”.

De fato - além das emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis na construção e na fabricação e transporte dos componentes eletromecânicos das usinas, que só ocorrem durante a implantação das obras - as hidrelétricas emitem gases de estufa, em parte devido à decomposição de material orgânico remanescente no fundo dos reservatórios, com liberação principalmente de metano, que se dissolve na água. Durante o funcionamento, boa parte dessa água passa pelas turbinas e sai borrifada em gotículas contendo gases dissolvidos, cuja presença seria bem menor se as empreiteiras responsáveis pelas construções desbastassem previamente as áreas a serem inundadas e removessem toda a madeira e resíduos orgânicos para locais não inundáveis.

Por outro lado, nas estações secas, quando cai o nível dos reservatórios, o lodo e resíduos vegetais que ficam nas orlas devem ser removidos, para que, nas cheias, não se misturem à água que se vai acumulando. Para evitar que esse material se decomponha, emitindo metano, pode-se compostá-lo e, em função de estudos agrônômicos, aproveitá-lo como bio-fertilizante, criando-se assim uma interessante atividade econômica para comunidades locais que tivessem a iniciativa de fundar cooperativas com esse objetivo.

Desde que esses cuidados sejam tomados, os impactos das hidrelétricas podem ser naturalmente assimilados pelos ecossistemas regionais, e seus reservatórios se assemelharão a lagos naturais. Entretanto, como a derrubada das florestas comprometeria o regime hidrológico, portanto a geração elétrica, as empresas concessionárias dos aproveitamentos hidrelétricos deveriam ser as maiores responsáveis pela preservação das florestas.

As diversas bacias hidrográficas brasileiras e seus potenciais estão apresentadas em detalhe no item 9.2.2.

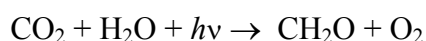
### 5.2.2 - Conversão de energia luminosa em matéria orgânica

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 absorve 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 (baixa entropia), a partir de dióxido de carbono e a água, que são compostos de baixo potencial energético (alta entropia) existentes na atmosfera.

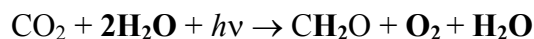
De maneira simplificada, podemos representar a fotossíntese pela seguinte reação, onde  $h\nu$  é a energia dos fótons:



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 da matéria orgânica. Entre outros fenômenos, constata-se que, a partir dos carboidratos sintetizados e juntamente com substâncias existentes no solo, formam-se todos os compostos orgânicos da planta (proteínas, ácidos, gorduras e pigmentos), através de reações bioquímicas catalisadas por enzimas, que ocorrem nos mencionados centros de reação (Mathis, 1.987).

A luz desagrega as moléculas de água, liberando oxigênio e hidrogênio. Testes feitos com água marcada com o isótopo <sup>18</sup>O do oxigênio (H<sub>2</sub><sup>18</sup>O) liberaram oxigênio gasoso contendo o isótopo <sup>18</sup>O, enquanto outros testes, feitos com água normal, liberaram o isótopo estável, que é o <sup>16</sup>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 absorvido no processo de fotossíntese. Como cada molécula de água contém apenas um átomo de oxigênio, pelo menos duas moléculas de água devem participar, de modo que

seria mais apropriado escrever a reação da seguinte forma:



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.

A eficiência da fotossíntese é a razão entre a energia química acumulada no processo de formação de determinada massa de tecido vegetal, e a energia solar recebida. Mede, portanto, a fração de energia luminosa convertida em matéria vegetal.

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. Tal diferença não pode ser medida diretamente, mas pode ser avaliada em função da variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) num processo semelhante, que ocorresse em ambiente isolado.

Para a reação de fotossíntese temos (em condições normais de temperatura e pressão)  $\Delta G = 47 \times 10^4$  J/mol, ou seja, 112 kcal/mol (Boardman, N.K.; Larkum, A.W., 1.974).

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  $6,8 \times 10^{-7}$  m, compreendendo a luz visível.

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  $6,63 \times 10^{-34}$  J·s (joules×segundo) e  $\nu$  é a frequência da radiação, que é igual a  $c/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda na faixa do espectro considerada ( $6,8 \times 10^{-7}$  m) e  $c$  é velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m·s<sup>-1</sup>).

Pela lei da equivalência fotoquímica, de Einstein, cada fóton (ou *quantum* de luz) absorvido excita uma molécula, 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,  $N \cdot hc/\lambda$  onde  $N$  é o número de Avogadro ( $N = 6,02 \times 10^{23}$ ). O resultado final, isto é, a quantidade de matéria sintetizada (ou o número de moléculas transformadas, por mol-quantum absorvido) depende das reações que se seguem à excitação inicial. Experimentalmente, constata-se que, para reduzir cada molécula-grama de  $\text{CO}_2$  e sintetizar uma molécula-grama de  $\text{CH}_2\text{O}$ , armazenando 112 kcal sob a forma de energia livre na molécula de carboidrato sintetizada, são necessários, no mínimo, 8 mol-quanta de luz visível. A energia correspondente é:

$$8 \times 6,02 \times 10^{23} \times 6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 6,8 \times 10^{-7} = 140,8 \times 10^4 \text{ J} = 336 \text{ kcal.}$$

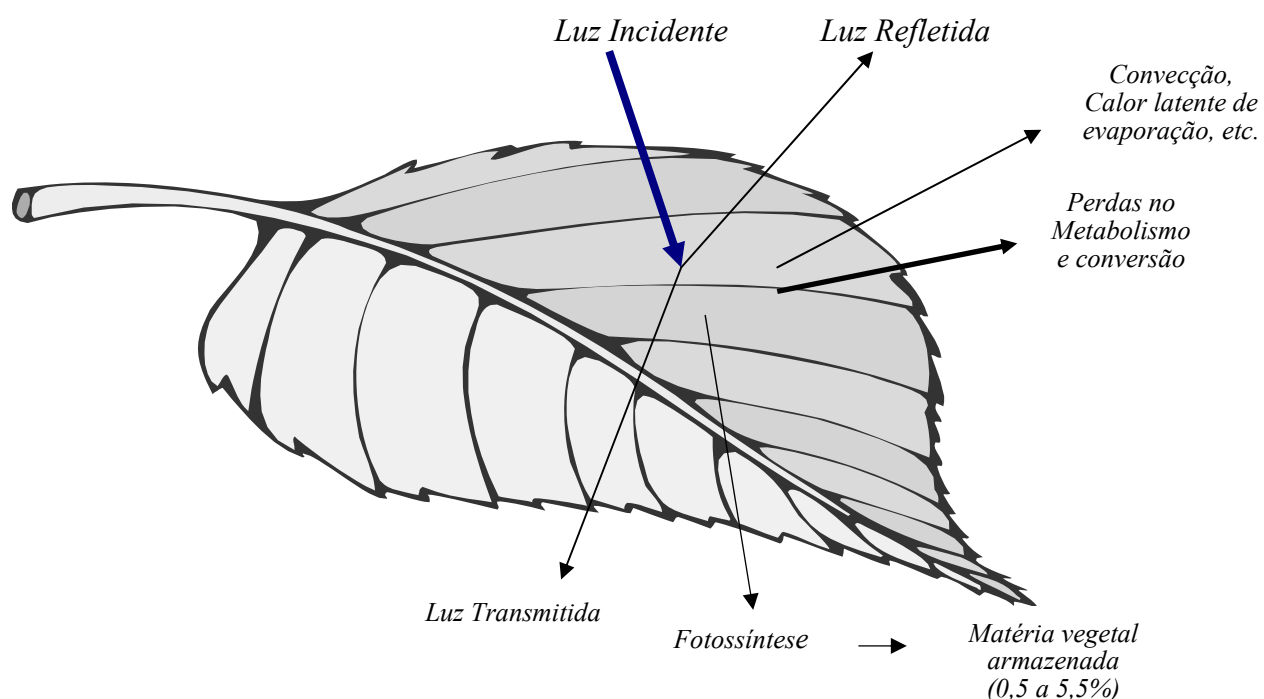
Isto significa que uma variação de energia livre de 112 kcal, correspondente à redução de cada molécula-grama de  $\text{CO}_2$  da atmosfera para a síntese de  $\text{CH}_2\text{O}$ , requer 336 kcal de



energia solar. Portanto, *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 33%).

A eficiência final 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. 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. Cada cloroplasto compõe-se de corpos granulados com diâmetro entre 0,3 e  $0,5\mu\text{m}$ .

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 (Carvalho, 2.006). A figura 6 ilustra o fenômeno.



**Figura 6** Perdas de energia na folhagem das plantas

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 o processo completo deve ser modelado pela seguinte reação:  $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

Os principais compostos orgânicos sintetizados na planta são essencialmente glicídios

( $C_6H_{12}O_6$ ), armazenados na forma de polímeros naturais, como a celulose, as hemiceluloses, a lignina, e, em menores proporções, compostos com diferentes arranjos estruturais de átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, formando proteínas, enzimas, vitaminas, etc., que – eventualmente em associação com minerais absorvidos do solo pelas plantas – constituem a base das cadeias alimentares que sustentam a vida animal.

Os polímeros armazenados nas plantas podem ser convertidos em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, mediante processamento mecânico, pirólise, hidrólise, fermentação, etc.

A faixa do espectro solar aproveitável para a fotossíntese corresponde a aproximadamente 50% da radiação que chega às folhas das plantas. Desse total, cerca de 10% são refletidos; 20% atravessam os tecidos da folha sem serem absorvidos; 20% são reemitidos ao ambiente como radiação térmica e aproximadamente 49,5% são absorvidos no metabolismo da planta e na evaporação da água proveniente de sua transpiração.

Ao final, a eficiência da fotossíntese fica entre 0,5% e 5,5%, dependendo da espécie vegetal (Boardman, N.K.; Larkum, *o.c.*). Ainda assim é significativa a quantidade de energia que se pode extrair de determinados vegetais.

### 5.2.3 “Plantações de energia”

O consumo de energia previsto no cenário sustentável, descrito mais adiante, poderia ser em grande parte coberto por combustíveis fósseis, particularmente o carvão, durante mais de um século, mas a crescente concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera exigirá que se desenvolvam e utilizem, em curto prazo, sistemas energéticos que não emitam CO<sub>2</sub> e que sejam capazes produzir energia para atender àquele consumo (Schobert, 2.001).

Para isso, a energia solar poderá ser a principal fonte de energia primária, mas há os obstáculos da intermitência horária e sazonal das radiações solares e a prática impossibilidade seu armazenamento, além da grande extensão das áreas requeridas para captá-las.

No futuro, é possível que esses obstáculos possam ser em parte contornados, mediante o armazenamento de energia solar convertida por meio de processos fotossintéticos mais eficientes do que aqueles que ocorrem naturalmente nas plantas e algas, mas os desafios tecnológicos para isso exigirão grandes investimentos, visando ao desenvolvimento de sistemas para a captura e conversão de radiações solares e seu armazenamento na forma de ligações químicas resultantes da dissociação de moléculas de água, com a liberação de oxigênio e a redução de combustíveis tais como hidrogênio, metano, metanol e outros (Cournac, 2.005).

Entretanto, por sua complexidade e pioneirismo, projetos desse tipo demandarão prazos muito extensos para chegar a um estágio de desenvolvimento técnico e econômico adequado para a produção de energia em larga escala.

Para os horizontes temporais considerados na presente tese, vamos considerar apenas combustíveis para os quais o Brasil já disponha de capacidade técnica e industrial para a produção e comercialização, em escala compatível com a demanda previsível.

Esses combustíveis são o etanol de cana de açúcar; o biodiesel (que pode ser obtido de diversas espécies de oleaginosas nativas ou aclimatadas no país) e combustíveis preparados a partir de descartes ou rejeitos da indústria madeireira, tais como lenha, aglutinados de serragem, cavacos e *pellets* de madeira, etc.

A extensão territorial e as condições climáticas brasileiras são favoráveis para as “plantações de energia”, isto é, plantações de espécies vegetais direta ou indiretamente aproveitáveis como fonte de energia. Além de serem renováveis e armazenarem energia para uso no momento oportuno, as plantações de energia oferecem vantagens tais como:

- Podem ser implantadas em larga escala, com tecnologia já dominada, em glebas descentralizadas, obedecendo a zoneamentos agro-ecológicos a serem elaborados em nível

municipal, sob orientação e controle dos órgãos federais responsáveis pelo meio ambiente e pela pesquisa agrícola (IBAMA, ANA, EMBRAPA) e entidades estaduais e municipais correlatas.

- Não requerem investimentos intensivos em capital, criam numerosos empregos no campo e pouco agridem o meio ambiente, desde que se adotem tecnologias especiais para seu plantio e exploração. 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.
- Podem contribuir para evitar a progressão de vossorocas, restaurando e aproveitando racionalmente determinadas regiões degradadas e parcialmente desertificadas.
- 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. No entanto, 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.

A tabela 4 indica algumas espécies vegetais apropriadas para plantações de energia, com os respectivos processos de conversão economicamente utilizáveis.

**Tabela 4** – Vegetais e derivados adequados ou promissores para produzir energia

<b>Vegetal ou derivado</b>	<b>Processo</b>	<b>Combustível</b>
Cana de açúcar	Processamento mecânico	Bagaço
Mosto de cana, sorgo, milho, etc.	Fermentação e Destilação	Etanol
Sisal e outras fibras lignocelulósicas	Hidrólise	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 (ou jacinto de água), etc.	Digestão anaeróbica	Metano
Resíduos agrícolas e da indústria madeireira	Pirólise e reforma	Hidrogênio
Etanol	Reforma	Hidrogênio
Algas verdes ( <i>Clamidomonas</i> )	Bioconversão	Hidrogênio

\* \* \*

Sobre um elemento de superfície ao nível do solo incide não apenas radiação diretamente emitida pelo Sol, com comprimento de onda entre 0,3 $\mu$ m e 5 $\mu$ m, mas também a radiação difundida isotropicamente por moléculas de gases atmosféricos, como nitrogênio, oxigênio, vapor de água, gás carbônico e outros.

A isto se soma ainda a radiação com comprimentos de onda entre 4 $\mu$ m e 80 $\mu$ m, que é reemitida pelo solo e refletida de volta por nuvens e partículas em suspensão.

A isto se soma ainda a radiação com comprimentos de onda entre 4 $\mu$ m e 80 $\mu$ m, que é

reemitida pelo solo e refletida de volta por nuvens e partículas em suspensão.

Há medições dos valores da insolação (em horas por ano) em função da latitude e características climáticas, e mapas de irradiação solar, mostrando curvas indicativas dos valores da energia que chega ao solo (por dia), coletada em estações de medida distribuídas pelo mundo. Esses valores são expressos em *langleys* (1 langley = 1 cal/cm<sup>2</sup> = 11,6 Wh/m<sup>2</sup>).

No Brasil, o valor médio da radiação solar ao nível do solo é da ordem de 370 langleys por dia.

Para se estimar o rendimento as plantações deve-se conhecer, além da respectiva eficiência fotossintética, o valor da insolação média anual na região considerada e o albedo, que é a razão entre a radiação refletida por um elemento de superfície e a radiação total que aquele elemento recebe do Sol, com o que se tem a quantidade de energia que chega ao solo; além de uma característica estrutural que mede a razão entre a área de folhas expostas à radiação e a área de terreno ocupada, que é o índice de área folhar – IAF (Tabela 5).

**Tabela 5 - Índices de Área Folhar (valores médios)**

<b>Vegetação</b>	<b>IAF médio</b>
Pastagem	1,37
Plantação de milho	2,06
Cana de açúcar	1,63
Floresta ripícola	3,14
Reflorestamento de eucalipto	2,12

**Fonte:** Xavier e Vettorazzi, 2.003

A tabela 6 apresenta a eficiência fotossintética (em termos médios) de algumas culturas adequadas e/ou promissoras para a produção de energia.

**Tabela 6 - Rendimentos de algumas culturas energéticas**

<b>Cultura</b>	<b>Eficiência fotossintética (%)</b>	<b>Rendimento (t/ha×ano)</b>
Cana de açúcar	~ 2,8	~ 80
Capim (pastagem média)	~ 3,0	~ 130
Eucalipto <i>Grandis</i>	~ 2,2	~ 30
Palmeiras (média)	~ 1,4	~ 10 *

\* Cachos, com 15% de óleo → 1,5 t de óleo, por hectare por ano

**Fonte:** (Cooper, 1975)

A crescente tomada de consciência dos governos e do público em geral, em relação aos problemas causados pelo aumento do teor de CO<sub>2</sub> na atmosfera tem feito crescer proporcionalmente o interesse pelos combustíveis fotossintéticos (ou biocombustíveis), como o etanol de cana de açúcar, a lenha, o carvão vegetal e o biodiesel, produzido a partir de óleos vegetais.

Coloca-se assim uma questão que vem sendo tratada de forma pessimista por determinadas organizações não-governamentais de estilo sensacionalista – e otimista, por uma parte do empresariado ligado ao agronegócio e ao comércio exterior.

Trata-se do problema da competição entre as áreas indispensáveis para a produção de alimentos e as grandes extensões de terras a serem ocupadas pelas plantações de energia (canaviais e culturas de espécies oleaginosas destinadas à produção de biodiesel, tais como mamona, dendê, girassol e soja).

Os balanços energéticos são parâmetros fundamentais para a definição da viabilidade dos projetos de produção de biocombustíveis.

Na fase agrícola, os balanços energéticos dependem diretamente dos rendimentos das plantações de energia e inversamente do consumo de fertilizantes, especialmente os nitrogenados.

Dependem também das distâncias de transporte do campo à unidade produtora e da possibilidade de emprego de rejeitos tais como bagaço, cascas, folhagens, etc. no processo de geração de energia para a operação da referida unidade.

Em muitos casos, os balanços podem ser melhorados sem o uso de fertilizantes de origem petroquímica, mediante a fixação biológica de  $N_2$  pela prática da chamada “adubação verde”, que consiste no plantio de leguminosas (como a soja, por exemplo) em talhões a serem alternada e ciclicamente intercalados nas plantações de energia, em forma de consórcio.

Culturas de alta produção de biomassa que requerem baixa adubação nitrogenada, como a cana-de-açúcar e o dendê, apresentam balanços energéticos muito favoráveis.

Ainda é necessário investir intensamente em projetos de pesquisa agrícola, pedológica, climatológica e energética, voltados para a obtenção de informações confiáveis sobre a expectativa de rendimento, em longo prazo, das diversas espécies consideradas para a produção de biocombustíveis, com os respectivos balanços energéticos, considerando-se todas as incidências em cada caso, desde a fase agrícola, até o transporte da massa vegetal do campo à unidade produtora do combustível, seu processamento e demais etapas.

- **Cana de açúcar → etanol**

Dependendo da espécie de cana, regime de chuvas, índice de área folhar, eficiência fotossintética, permeabilidade, fertilidade e incidência de radiação solar ao nível do solo, a produtividade de uma plantação pode passar de 90 toneladas de cana por hectare, por ano, mas não há dados experimentais efetivos sobre a sustentabilidade dessa produção, em longo prazo. Considerando-se as características das diversas regiões brasileiras adequadas para a

cana de açúcar, a produção pode ficar em torno de 70 toneladas por hectare, por ano, em bases sustentáveis.

O etanol é fermentado a partir de biomassa vegetal, num processo que utiliza enzimas para desencadear as reações. Da destilação do fermentado, podem ser extraídos até 80 litros de etanol por tonelada de cana.

A tabela 7 mostra a distribuição da energia contida em uma tonelada de cana, com os poderes caloríficos inferiores das partes constituintes (bagaço, palha e caldo/sacarose).

**Tabela 7 - Distribuição da energia em uma tonelada de cana**

Sacarose (► etanol ou ► açúcar)	→ $608 \times 10^3$ kcal
Bagaço c/ 50% de umidade	→ $598 \times 10^3$ kcal
Palha c/ 15% de umidade	→ $512 \times 10^3$ kcal
1 tonelada de cana*	► $1.718 \times 10^3$ kcal

Fonte: Oliverio, 2.003

(\*1 barril de petróleo tem  $1.386 \times 10^3$  kcal ⇒

⇒ 1 t de cana equivale a ~ 1,2 bep).

Muitas usinas brasileiras – sobretudo no Nordeste – desperdiçam parte do potencial energético do bagaço, mesmo assim elas são energeticamente auto-suficientes, pois a energia que consomem é gerada por combustão do bagaço. Entretanto, para maximizar o aproveitamento deste, seria necessário investir em equipamentos tais como moendas eletrificadas, caldeiras acima de 81 atm e turbinas mais eficientes.

Se for aproveitada uma parte do potencial energético do bagaço e 50% do da palha (os outros 50% da palha devem ficar no terreno, para devolver-lhe parte dos nutrientes e protegê-lo da erosão), pode-se obter um excedente de 82,5 kWh de energia elétrica, ou seja, para cada 1 milhão de toneladas de cana é possível instalar 15 MW de potência elétrica, com fator de capacidade de 60% (Nastari, 2.003).

Note-se que a safra da cana se dá na época da estiagem, quando o nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas está mais baixo, configurando-se assim uma sinergia entre o sistema hidroelétrico e a produção de álcool.

Entretanto, o etanol é empregado apenas em motores de ciclo Otto, dificilmente adaptáveis para os modos ferroviário, aeroviário e hidroviário.

- **Plantas oleaginosas → Biodiesel**

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 industriais, por exemplo).

Como os demais combustíveis de biomassa, o biodiesel apresenta as vantagens de ser renovável, não tóxico, biodegradável, etc.

A produção de biodiesel começa por uma filtragem dos óleos vegetais (ou das gorduras animais) e um processamento especial para a remoção de água e contaminantes. O material assim tratado passa por uma esterificação com metanol ou etanol, na presença de um catalizador (podem ser usados os hidróxido de sódio ou o de potássio). As moléculas de óleo (triglicerídeos) são em seguida craqueadas e reformadas em ésteres, dando como subproduto o glicerol, que é usado na indústria farmacêutica.

Além de ser um combustível renovável e ambientalmente limpo, o biodiesel pode desempenhar um papel importante para populações d, que vivem em regiões secas e áridas.

Em 2.004, a produção mundial de óleo de dendê superou 20 milhões de toneladas, das quais 80% no sul da Ásia, principalmente na Indonésia e Malásia, países pioneiros nas pesquisas para a utilização desse combustível. Aí, a experiência já adquirida indica que, em plantações bem manejadas, pode-se produzir, em média, até 20 t/ha×ano de cachos, contendo cerca de 18% de óleo, ou seja, 4t/ha×ano (Urquiaga, 2005).

Em média, nas condições brasileiras, considerando-se, em cada região, as plantações mais produtivas, a produção, em bases sustentáveis, pode ficar em torno de 1 t/ha×ano, de óleo com poder calorífico da ordem de 9.500 kcal/kg (cálculo baseado em dados apresentados em Embrapa, 2.005).

- **Nova geração de biocombustíveis**

Além do etanol obtido pela via da fermentação, estão sendo desenvolvidos novos combustíveis de biomassa, utilizando-se catalisadores que transformam os açúcares presentes no vegetal em hidrocarbonetos densos em energia (Regalbutto, 2009).

Se o uso de enzimas permite um processo mais seletivo, dirigido a um tipo específico de moléculas, os catalisadores podem operar em altas temperaturas, que normalmente destruiriam as enzimas. Isso permite que as reações sejam mais eficientes e velozes.

A produção de hidrocarbonetos semelhantes à gasolina e ao diesel a partir de biomassa vegetal é mais eficiente que a de etanol, porque este último exige uma destilação que requer grandes quantidades de energia, enquanto os hidrocarbonetos como os mencionados se separam automaticamente da água. O processo parte do açúcar e termina com a produção de



hidrocarbonetos semelhantes ao diesel, à gasolina e ao querosene, ou seja, combustíveis densos em energia, adequados para os diversos modos de transporte, inclusive para o transporte rodoviário pesado (cargas).

Graças a investimentos em P&D realizados por empresas norte-americanas, espera-se que esta nova geração de biocombustíveis esteja pronta para licenciamento em 2011 (Regalbuto, *op. cit.*).

Desde que os investimentos em pesquisa aplicada sejam pragmáticos (e suficientes) o Brasil também pode, em médio prazo, obter resultados práticos nesse campo.

- **Florestas industriais/energéticas → Matérias primas e combustíveis de madeira**

A madeira é uma alternativa tecnicamente viável para substituir materiais *energy intensive*, como ferro, aço, alumínio e plásticos.

No Apêndice C é apresentado um exemplo de cálculo do potencial de plantações florestais voltadas para a produção de combustíveis e de matérias de construção e é esboçado um estudo preliminar de uma fábrica de casas populares de madeira, totalmente autossustentável em energia e matérias primas.

#### 5.2.4 Outras fontes renováveis

O primado dos sistemas energéticos centralizados em torno de usinas de geração elétrica ou de refinarias de petróleo de grande porte – interligadas por meio de linhas de transmissão e redes de distribuição e/ou por *pipelines*, gasodutos transcontinentais e frotas de petroleiros e caminhões-tanques – retardou o desenvolvendo de sistemas descentralizados, voltados para a produção localizada de combustíveis ou para a geração distribuída de energia elétrica. No tocante a esta, o paradigma centralizado emergiu há mais de um século, nos rescaldos da concorrência entre os grupos de Thomas Edison e George Westinghouse (Novick, 1.975), dando origem a poderosos monopólios baseados na produção e distribuição de energia e na fabricação de equipamentos de pequeno, médio e grande porte, desde lâmpadas, até grupos geradores completos, sem levar em conta que, dependendo de características regionais, como densidade demográfica, modelos de ocupação do território, urbanização, industrialização e localização das fontes energéticas disponíveis, um ou outro sistema ganha em eficiência. Na virada do século XIX para o XX as únicas fontes primárias para geração de energia elétrica em grande escala eram o carvão e o potencial hidrelétrico (Rudolph, 1.986).

Posteriormente entrou o gás natural e, já na década de 1.950, veio a fissão nuclear em escala comercial. Assim, não interessava aos monopólios – locais ou regionais, privados ou públicos – baseados nessas fontes, explorar o fato de que, em determinadas circunstâncias, os sistemas descentralizados são mais favoráveis do que os centralizados, para o emprego de fontes renováveis de energia tais como a eólica; a solar direta, as biomassas e até os resíduos agrícolas e urbanos, que podem ser usados, seja diretamente como energia mecânica (turbinas eólicas), seja como combustível, seja, ainda em processos fermentativos, para a produção de biogás. O mesmo fenômeno ocorreu no Brasil, o que explica o atraso no aproveitamento de fontes de energia renováveis excepcionalmente abundantes no país, tais como os potenciais eólico, fotovoltaico e termosolar, além dos espaços aproveitáveis para culturas energéticas.

### 5.3 Depósitos de energia - fontes não renováveis

Graças às radiações solares que incidiram sobre a Terra há centenas de milhões de anos, tiveram origem e se desenvolveram desde microorganismos, como bactérias e microalgas, até árvores gigantes e grandes animais, cada qual com seu ciclo de vida, terminando em morte e decomposição. Há cerca de 300 milhões de anos, troncos, raízes, galhos e folhas de árvores que cresceram e morreram em regiões pantanosas, depositaram-se no fundo lodoso e ficaram encobertas. O tempo e a pressão das camadas de terra que se foram acumulando sobre esses resíduos, fossilizando-os e os transformando em depósitos de materiais homogêneos – a turfa e o carvão. Durante as eras de aquecimento global – que se supõe terem ocorrido há 150 e há 90 milhões de anos – certas micro-algas, principalmente das famílias das *Botrycoccus* e das diatomáceas, ricas em lipídeos, além de bactérias e remanescentes de plantas que viveram e morreram sobre superfícies aquáticas, submergiam e se incorporavam aos leitos de mares e lagos, decompondo-se e gerando os componentes básicos dos depósitos de petróleo. E as folhas e outros resíduos de plantas terrestres iam sendo carregados para o fundo do mar pelos rios ou pela erosão, criando, sob elevadas pressões e temperaturas, condições para a formação de depósitos de gás. Assim, embora sejam, remotamente, de origem solar, os combustíveis fósseis não são renováveis na escala temporal humana, pois foram acumulados por fotossíntese em vegetais e em determinados organismos que deles se nutrem, ao longo de milhões de anos. A seguir são apresentadas algumas informações básicas sobre o carvão, o petróleo e o gás natural.

- **Carvão** Dependendo da origem, o carvão pode conter 25% a 97% de carbono; 2% a 6% de hidrogênio; 2% a 20% de oxigênio, traços de nitrogênio e enxofre, além de diferentes minerais. A combustão do carvão é muito poluidora, implicando, entre outras, reações tais como  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ ;  $S + O_2 \rightarrow SO_2$ ;  $N + O_2 \rightarrow NO_2$  e minerais  $\rightarrow$  cinzas.

Em função do teor de carbono, o carvão é classificado em quatro categorias:

1. Os linhitos (25% a 35% de carbono), que se encontram mais à superfície e são usados principalmente em usinas termelétricas.
2. Os carvões sub-betuminosos, com 35% a 45% de carbono. Os carvões brasileiros são preponderantemente sub-betuminosos e linhitos, com poder calorífico médio em torno de 3.600 kcal/kg.
3. Os carvões betuminosos, ou hulhas, com poder calorífico que pode chegar a 7.800 kcal/kg. Estes carvões constituíram a principal fonte de energia dos processos produtivos que surgiram

com a Revolução Industrial. Até hoje, são os combustíveis mais empregados na geração termelétrica. Por suas propriedades coqueificantes, são muito empregados na siderurgia.

4. Os antracitos, de alta dureza e teores de carbono de 86% a 97%. Por sua pureza, são adequados para uso urbano (aquecimento ambiental) e em determinadas indústrias.

- **Petróleo** O termo petróleo designa uma grande variedade de misturas de hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos, de diversas massas moleculares. Nos petróleos pesados e betumes a proporção de hidrocarbonetos está em torno de 50% e nos leves pode chegar a 95%. A rigor, o petróleo abrange três famílias de hidrocarbonetos:

1. Alcanos, que são hidrocarbonetos alifáticos saturados, de fórmula geral  $C_nH_{2n+2}$ , com cadeia linear ramificada ou não (Tabela 8). Em função do número de átomos de carbono, ocorrem em estado gasoso, líquido ou sólido, cada um podendo conter, em mistura, traços dos outros dois.

**Tabela 8 – Famílias de hidrocarbonetos**

Número de átomos de carbono na cadeia molecular	Estado físico, em temperatura ambiente
1 a 4	Gasoso
5 a 15	Líquido
Acima de 15	Sólido

Fonte: Campbell, 2005, p. 30

2. Hidrocarbonetos não saturados, com cadeia fechada, como os aromáticos, dos quais o mais simples é o benzeno ( $C_6H_6$ ).

3. Betumes, asfaltos e graxas, que são compostos de elevada massa molecular, ricos em nitrogênio, oxigênio, enxofre, níquel, etc.

**Tabela 9 – Composição do petróleo**

Elemento	C	H	N	O	S	Metais
%	83 a 87	10 a 14	0,1 a 2	0,1 a 1,5	0,5 a 6	< 1000 ppm

Fonte: Carvalho, 2008, p.31

A composição do petróleo varia de campo para campo, aproximadamente da forma indicada na tabela 9.

- **Gás natural.** Sendo formado nas mesmas condições e a partir de componentes semelhantes aos do petróleo, o gás geralmente ocorre associado a este – ou nele dissolvido, quando o reservatório está sob pressão elevada. Sua composição é a indicada na tabela 10.

**Tabela 10 – Composição do gás natural**

Componente	Metano ( $CH_4$ )	Etano ( $C_2H_6$ )	Propano ( $C_3H_8$ )	Butano ( $C_4H_{10}$ )	$CO_2$ ; $H_2S$ ; $N_2$ , etc.
%	75% a 90%	5% a 15%	< 5%	< 5%	Traços

Fonte: Carvalho, 2008, p.31

Um pouco abaixo da temperatura ambiente, o butano e o propano condensam-se, formando o gás liquefeito de petróleo ou GLP.

Para os transportes terrestres, marítimos e aéreos, o gás natural não substitui inteiramente os combustíveis derivados de petróleo, porém apresenta a vantagem de ser extraído sob sua própria pressão e facilmente transportado em gasodutos ligando os campos de gás às instalações de estocagem, que por sua vez são conectadas aos consumidores, por meio de redes de distribuição subterrâneas.

\* \* \*

Em 2.005 o carvão, o petróleo e o gás natural responderam, respectivamente, por cerca de 25%, 34% e 21% da energia consumida no mundo, em usinas termelétricas instaladas em diversos países industrializados e como combustível automotivo e industrial (IEA, 2006).

Além disso, o petróleo e o gás natural constituem matéria prima para inúmeros produtos fundamentais, destacando-se as matérias plásticas. No caso do gás natural, este é matéria prima para cerca de 80% da produção mundial de fertilizantes nitrogenados.

O carvão é empregado principalmente na geração termelétrica, de modo que sua substituição é problemática em países que não disponham de alternativas ambientalmente mais limpas. O Brasil, que até o presente aproveitou apenas 28% de seu potencial hidrelétrico, está em posição privilegiada para, desde já, ir adotando políticas destinadas a reduzir gradativamente a participação do carvão em sua matriz energética. Segundo o BEN 2007/2006, essa participação é atualmente de 1,7%.

Sem petróleo e gás serão inúteis as modernas tecnologias agrícolas, industriais e de transportes, de modo que a produção da economia poderá ficar insuficiente para sustentar os mais de 200 milhões de habitantes que o país deverá ter, quando a oferta daqueles combustíveis estiver escasseando. E seria ilusório esperar que, se forem mantidas as atuais tendências, os processos produtivos possam ser modificados somente pela ação das forças do mercado.

Programas destinados a adaptar as tecnologias e sistemas agrícolas, industriais e de transporte ao cenário de escassez de combustíveis fósseis deveriam começar a ser planejados e implantados o mais cedo possível, em cooperação do Estado com o setor privado, visando à gradual introdução dessas tecnologias e implantação desses sistemas, antes que sobrevenha um colapso de abastecimento.

## 6 ENERGIA E SOCIEDADE – SÍNTESE HISTÓRICA

Há vestígios de utilização do fogo por hominídeos, remontando a mais 1,9 milhões de anos (Bowman *et al*). E entre 200.000 e 50.000 anos atrás, o *Homo neanderthalensis* usava o fogo para a cocção de alimentos (Jacomy, 1990).

Na medida em que iam sendo descobertas e usadas, as fontes de energia imprimiam novos rumos para a evolução da sociedade humana.

As primeiras civilizações só apareceram de fato com a cultura irrigada de cereais, há cerca de 6.000 anos, na Mesopotâmia, tendo como fonte de energia a força muscular, complementada pela energia cinética dos cursos de água, além da tração animal e da lenha. O fogo já era então usado de forma controlada (Hémery, D. *et all*, 1991).

Na Ucrânia, há mais de 4.000 anos, o emprego de cavalos para tração e montaria viabilizou o transporte de alimentos e madeira de regiões distantes, permitindo que a lenha pudesse ser usada como fonte regular de energia para olarias e fundições primordiais, acarretando profundas transformações econômicas e sociais, que se estenderam na direção da Europa Ocidental na Idade do Cobre (Anthony *et.all*, 1991).

Embora a madeira seja um combustível potencialmente renovável, a tecnologia para aproveitá-la em larga escala – silvicultura – ficou estagnada durante muitos séculos. Como as populações eram primitivas eram rarefeitas (V. Tabela 11), o próprio ciclo natural assegurava a regeneração e reposição das florestas.

Depois, ao longo dos séculos, foram-se agregando outras fontes de energia, tais como os ventos (barcos a vela, moinhos), o óleo de baleia, a turfa etc.

**Tabela 11 – Evolução da população mundial, de 6.000 a.C., até a Revolução Industrial**

ANO	6.000 a.C.	1 a.D.	1.000 a.D.	1.500 a.D.	1.600 a.D.	1.750 a.D.
População (milhões)*	~ 7	~ 300	~ 310	~ 500	~ 560	~ 800

Fontes: Durand, 74; Haub, 95; United Nations, 99

\* Médias aritméticas dos valores apresentados nas fontes consultadas

Os primeiros sinais de manejo florestal voltado para a obtenção de madeira de construção (e lenha) só surgiram na China, durante a Dinastia Han (206 a.C. a 220 a.D.) e mais tarde, na Dinastia Ming, que foi de 1.368 a.C. até 1.644 a.D. (Hémery, D. *op cit.*).

No Ocidente, a silvicultura – ainda de forma rudimentar – teve seus primórdios na Idade Média, quando as terras eram controladas pelos senhores feudais.

A silvicultura como atividade econômica planejada teve suas bases científicas formuladas e desenvolvidas na Alemanha, nos séculos dezoito e dezenove.

Toda a tecnologia industrial alemã do século dezoito baseava-se na madeira, a começar pelos processos de mineração e refino de metais, que dependiam de troncos, para suporte das

galerias, e de carvão vegetal, para a redução dos minérios e geração de calor. A madeira era o combustível universal, além de ser o único material de construção que se oferecia como alternativa à pedra e à alvenaria, nas casas e obras públicas. Era, também, o material por excelência da construção naval.

Na Alemanha, até fins do século XIX, a madeira era mais importante do que hoje são o aço, o carvão mineral, o petróleo, etc. Não se podia, pois, permitir que as reservas florestais se esgotassem. Começou, assim, o desenvolvimento de uma economia florestal sistemática e, já no início do século dezenove existiam naquele país cursos regulares de silvicultura.

No limiar do século XVIII as florestas inglesas estavam sendo devastadas pela extração de lenha e madeiras, especialmente para a construção de navios para a armada.

Já o carvão era abundante e barato, chegando mesmo a aflorar à superfície do terreno, em determinadas regiões, de modo que, em pouco tempo, passou à frente da madeira como fonte de energia. Com isso, as jazidas mais acessíveis foram-se esgotando e a exploração teve então que descer ao subsolo, em poços e minas freqüentemente inundadas, tornando indispensável o bombeamento. Essa necessidade está na origem da tentativa de empreendedores ingleses e escoceses, de se empregar a máquina a vapor para o acionamento de bombas, em minas de carvão.

Contudo, a primazia no emprego das propriedades expansivas do ar aquecido para o acionamento de mecanismos coube aos mecânicos da escola criada por Alexandre o Grande, que elevou a tecnologia grega a um alto nível de desenvolvimento.

Destacam-se aí os nomes dos grandes mecânicos Archiyas, Ctébsibios e Philon de Bisâncio, que viveram entre os séculos I e IV a.C. (Jacomy, *op. cit.*).

À mesma escola pertenceu Herão de Alexandria, que pela primeira vez usou as propriedades do vapor para acionar um dispositivo mecânico, a Eolípila. Tratava-se de uma esfera alimentada a vapor, que girava sob o empuxo de dois jatos escapando de tubos ajustados de lados opostos. Como ainda não se tinham desenvolvido materiais e técnicas de caldeiraria adequadas, não se construiu nenhuma Eolípila de dimensões aproveitáveis para fins práticos.

A primeira máquina a vapor operativa foi a bomba desenhada e construída em 1698 por Thomas Savery, para bombear água de minas (Barghini, 1971).

Esta máquina não tinha nenhum êmbolo ou pistom, usando, para aspirar a água, apenas o vácuo criado pela condensação do vapor, para lançá-la na superfície, por meio de um arranjo de válvulas. Diversos problemas técnicos impediram que ela produzisse os resultados esperados.

Em 1712 o comerciante de máquinas de mineração Thomas Newcomen, com o apoio do físico Robert Hook, desenvolveu uma máquina a vapor efetivamente operativa, que, posteriormente, foi aperfeiçoada por James Watt e passou a ser empregada em fábricas, locomotivas, navios, etc. Sem ela, a revolução industrial não teria tomado o rumo que tomou.

No século XIX, entre os anos de 1.830 e 1.840, o emprego da eletricidade nas comunicações (telégrafo) e na metalurgia (galvanoplastia) despertou o interesse dos empresários industriais, mas o grande impulso só veio em 1.878, quando Thomas Edison colocou em condições de uso a lâmpada incandescente de filamento e Werner Siemens apresentou a primeira locomotiva elétrica.

Um pouco mais tarde, Nikola Tesla desenvolveu o motor de corrente alternada, graças ao qual a eletricidade passou a ser usada nas fábricas, para o acionamento mecânico.

Ao mesmo tempo aperfeiçoava-se a turbina hidráulica, como alternativa para a turbina a vapor, até então usada preponderantemente na geração elétrica. Apareceram então as primeiras hidroelétricas de certo porte, com linhas de transmissão que permitiam o uso da energia dos rios, nas cidades e nas fábricas.

Há registros históricos datando do quarto milênio antes de Cristo, relativos a usos de petróleo (do grego *πετρέλαιο*, pelo latim *petra* = pedra + *oleum* = óleo) no Oriente Médio, onde são freqüentes as exsudações e afloramentos de hidrocarbonetos.

No início da era cristã os árabes já o usavam em suas lâmpadas a óleo e no século XIII, existia uma primitiva indústria do petróleo, quando as ruas de Bagdad eram pavimentadas com alcatrão. Ainda no século XIII Marco Polo descreveu campos de petróleo, no Azerbaijão (Petroleum, 2.007).

Mas foi na virada dos séculos XIX para XX que o petróleo passou a ser usado em larga escala – era a “idade do petróleo” que começava.

Embora o carvão ainda seja um dos combustíveis mais consumidos, foi o petróleo que consolidou o modelo industrial moderno, caracterizado pela produção em massa, com os setores mais dinâmicos forçando o desenvolvimento tecnológico de indústrias satélites, ligadas às respectivas linhas de produção.

Na medida em que ficavam mais problemáticas, as velhas fontes iam sendo complementadas – ou substituídas – por novas fontes, mais eficientes: a força muscular foi complementada pela lenha e pela tração animal, que foi complementada pela energia das águas e dos ventos, etc. Depois veio o carvão, que foi complementado pelo petróleo – ou por este substituído, na indústria, nos transportes e nos modernos sistemas agro-industriais.

Concomitantemente, as matrizes energéticas iam-se ajustando a essas fontes.



Até o presente não foram encontrados substitutos comparáveis ao petróleo e ao gás natural, no que diz respeito à densidade energética, à transportabilidade e a outras características, que lhes conferem as qualidades para serem usados em larga escala nos transportes, na indústria e na agricultura. Assim, o desenvolvimento subsequente à Revolução Industrial apóia-se em bases fisicamente insustentáveis em longo prazo.

O petróleo abundante e barato ofereceu as condições básicas para o vertiginoso desenvolvimento da indústria automobilística, com seus fornecedores e sub-fornecedores e uma poderosa estrutura de comercialização que se estende por todo o mundo, em paralelo à rede de distribuição de combustíveis. Desde as primeiras décadas do século passado, a indústria automobilística vem exercendo um papel de paradigma para a moderna civilização humana. Transformado em suprema aspiração de posse das famílias, o automóvel condicionou a evolução social e, tendo consagrado o transporte individual, deu forma às cidades modernas.

Por dependerem diretamente de produtos da indústria automobilística, os atuais modelos de ocupação do território, urbanização e uso dos solos constituem mesmo a imagem da “idade do petróleo”.

A indústria automobilística e o motor de combustão interna estão presentes no mundo inteiro e os automóveis, ônibus, caminhões e tratores fazem parte do cotidiano de boa parte da humanidade, de sorte que qualquer turbulência que afete a produção do complexo industrial-comercial-financeiro direta ou indiretamente ligado essa indústria reflete-se diretamente sobre toda a economia mundial, em particular sobre o nível de emprego.

Este é um dos motivos que contribuem para colocar as reservas estratégicas de petróleo no foco dos principais conflitos que têm dominado a cena mundial nas últimas décadas, sobretudo no Oriente Médio, mas também no mar Cáspio, na África e no mar da China, com potencial para chegar à América Latina.

A chamada “revolução verde” deve-se, em última análise, aos fertilizantes e pesticidas de origem petroquímica e à mecanização das atividades rurais, alimentada a combustíveis derivados do petróleo, tudo isso em descomasso com o ciclo de regeneração natural dos solos (Kunstler, 2.005).

A globalização da economia também foi fruto da abundância e modicidade de petróleo que – transportado por grandes petroleiros – torna-se disponível no mundo inteiro, permitindo a instalação de fábricas em países da Ásia, África e América Latina, onde populações que vivem no limiar da subsistência oferecem mão de obra por uma fração do custo da oferecida nos países ditos desenvolvidos (Kunstler, *op cit.*).

Há alternativas para alguns dos atuais usos do petróleo ou do gás. Tem-se os biocombustíveis, para os transportes e a energia nuclear, para a geração de energia elétrica, por exemplo. Mas essas alternativas, isoladamente ou em conjunto, não poderão substituir, nas atuais escalas, o petróleo e o gás natural, em aplicações vitais como, por exemplo, a produção, transporte e distribuição de alimentos.

As usinas eletronucleares surgiram na década de 1.950, cercadas de contradições provocadas, de um lado, por sua imagem destrutiva, ligada à devastação causada pelas bombas de urânio e plutônio, lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki e, de outro lado, pela imagem construtiva, associada aos radiofármacos e às aplicações biomédicas dos radioisótopos.

A primeira central nuclear comercial do mundo entrou em operação em 1.955, em Calder Hall, Inglaterra. Era um reator moderado a grafite e refrigerado a gás (tipo Magnox) e tinha apenas 9 MW elétricos. Depois, ainda em Calder Hall, foram instalados outros reatores Magnox, com potências começando em 50 MW e chegando até 600 MW. Embora tenham operado bem, a eficiência térmica e o *burnup* daqueles reatores eram baixos, em parte devido a limitações impostas pelos danos causados pelos fluxos de neutrons na liga metálica de revestimento dos combustíveis nucleares (liga magnésio com pequenas proporções de alumínio e berílio).

A indústria nuclear civil cresceu muito a partir do uso dos reatores a água leve pressurizada, graças, principalmente, ao fato de que grande parte dos investimento em P&D voltado para o desenvolvimento da tecnologia básica desses reatores veio dos orçamentos militares do governo americano, na rubrica do programa de reatores de dimensões adequadas para equipar submarinos a propulsão nuclear. Empresas como a Whestighouse, a General Electric e outras aproveitaram aqueles investimentos para viabilizar economicamente o desenvolvimento de reatores de potência em escala comercial e, posteriormente, negociaram os direitos sobre a engenharia básica das usinas equipadas com reatores a água leve, com a estatal francesa FRAMATOME e com a KWU, subsidiária da alemã Siemens.

A partir dos acidentes de Three Mile Island, nos Estados Unidos (1.979) e Chernobyl, na Ucrânia, junto à Bielorrússia, (1.986), a indústria nuclear tem enfrentado uma forte oposição da opinião pública, embora em alguns países (a França, em particular) o parque nuclear continue a ser a principal fonte geradora do sistema elétrico.

\* \* \*

A ilusão de que a tecnologia sempre daria ao homem capacidade para sustentar grandes populações em territórios pequenos, colocou em posição secundária a milenar

preocupação humana com o problema das dimensões da população relativamente aos territórios ocupados.

Embora na antiguidade clássica ainda não existisse uma ciência da demografia, o problema do crescimento da população foi objeto de reflexões, entre outros, de Platão (427 a.C.– 347 a.C.), que chegou a pensar em um número ideal de habitantes para a cidade (Platão, *Laws*, Dover, 2.006, p. 99 a 101); e de Aristoteles (384 a.C.– 322 a.C.), que se preocupou com o crescimento desproporcional do número de magistrados em relação ao de artesãos, face à limitação das terras disponíveis para cada estrato social (Aristoteles, *Politics*, Dover, 2.000).

Já na idade moderna encontramos, por exemplo, Montesquieu (1.689 - 1.755) que, em seu romance epistolar “Cartas Persas”, interessou-se pela então nascente ciência da demografia, fazendo comparações um tanto irônicas entre o Islã e Igreja Católica (Montesquieu, 2005). E o enciclopedista Condorcet (1743 - 1794), em seu *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, vaticinou que se o aumento da população ultrapassar a capacidade (da natureza) de produzir meios de subsistência, haveria uma “diminuição da felicidade” (Condorcet, 1798).

O mais conhecido estudo sobre a questão foi, provavelmente, o “Ensaio sobre o princípio da população”, de Thomas Malthus (1.766 - 1.834), para quem a expansão demográfica – que segue em progressão geométrica – seria contida pela escassez de alimentos, cuja produção cresce apenas em progressão aritmética.

John Stuart Mill (1.806 - 1.873), em seu livro *The Principles of Political Economy* (capítulo 6 - *Of the Stationary State*), coloca-se em posição semelhante às de Malthus e do Marquês de Condorcet, posição a que se opunha, *verbi gratia*, a poderosa corrente dos seguidores do pensamento do Conde de Saint-Simon (1.760-1.825): “*a cada um segundo sua capacidade, a cada capacidade segundo seu trabalho*”.

O progresso industrial alimentado a petróleo abundante e barato enfraqueceu a corrente – chamada “malthusiana” – daqueles que se preocupavam com o crescimento da população, com o caráter finito dos recursos naturais, com a correlação entre o desenvolvimento e o uso de energia, e com o fato de que a vida, como a conhecemos, depende da conversão de fatores de baixa entropia (os recursos naturais) em fatores de alta entropia.

Não havia interesse prático por temas ligados às interrelações entre demografia, desenvolvimento social e uso de recursos naturais.

Um dos primeiros estudiosos a abordar a questão – ainda que de forma restrita a aspectos isolados – foi o sociólogo e filósofo positivista inglês Herbert Spencer (1820 - 1903), para quem o uso de energia seria responsável pelas diferenças materiais entre as sociedades, e

a humanidade poderia chegar à perfeição com base em concepções científicas avançadas para a época, tais como o primeiro princípio da termodinâmica e a teoria da evolução.

Outro foi o biólogo, urbanista e sociólogo escocês Sir Patrick Geddes (1854 - 1932), que, em seus trabalhos sobre planejamento urbano, introduziu os conceitos de região e de conurbação, e procurou definir uma unidade de medida comum, para explicar as correlações entre o uso de recursos materiais e o desenvolvimento econômico e social.

Até então os poucos que se interessavam pelo assunto consideravam que a evolução da sociedade para estágios superiores implicava o aumento do consumo de energia e o problema era tratado no contexto do primeiro princípio da termodinâmica.

Em 1.909, no livro *Energetische*, o químico teuto-letão Friedrich Wilhelm Ostwald (1853 -1932), ganhador do Prêmio Nobel de 1.909 por seus trabalhos sobre catálise e equilíbrio químico, sustentava que toda evolução social baseia-se na transformação de energia primária (*rohe Energie*) em energia útil (*Nutzenergie*).

Pouco depois de Ostwald, outro ganhador do Prêmio Nobel de química, o inglês Frederick Soddy (1877-1956) assinalou que, não podendo ser reciclada, a energia colocaria limites para as atividades da sociedade. Introduzia-se, assim, a segunda lei da termodinâmica, nas questões econômicas (Rosa *et al*, 1988).

No entanto, a partir da Exposição Universal de Chicago, de 1.933, cujo lema foi “A ciência descobre, a indústria aplica, o Homem se adapta”, a idéia de que o engenho humano acabaria encontrando uma solução para o problema da limitação dos recursos naturais ganhou força na corrente dominante do pensamento econômico. A partir daí esta corrente consegrou o dogma de que o crescimento da produção resolve todos os problemas que surgirem.

Mais tarde, graças às pesquisas do estatístico e economista rumeno Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994), a corrente *malthusiana* conquistou importantes seguidores, incomodando a tal ponto a poderosa corrente *anti-malthusiana* – principalmente nos Estados Unidos, onde Georgescu-Roegen lecionou de 1.950 a 1.976 – que citar seus trabalhos equivalia a apelar para uma ciência menor.

O prejuízo causado às ciências sociais, econômicas e políticas pelo ostracismo em que foram lançados Georgescu-Roegen e seus seguidores (chamados *economistas ecológicos*) reflete-se, entre outras coisas, no atraso sofrido pelas pesquisas sobre as interrelações entre demografia, meio ambiente e desenvolvimento econômico.

Disso resultou a prática inexistência de políticas públicas à altura da importância do problema da expansão demográfica – em particular de políticas especificamente voltadas para o planejamento familiar.

A revolução verde e os sistemas de transporte de cargas e conservação e comercialização de produtos agrícolas favoreceram a explosão demográfica que, dos anos 1.950 para cá, isto é, em pouco menos de 60 anos, elevou a população mundial de 2,5 bilhões para 6,6 bilhões de habitantes, como mostra a tabela 12.

**Tabela 12 - População mundial, de 1750 até o presente**

ANO	1.750	1.850	1.950	1.970	1.990	2.008
<b>População</b> (bilhões)	0,8	1,2	2,5	3,7	5,3	6,6

Fontes: Cipolla, 64, p. 99 e Divisão populacional da ONU

E os governos nada faziam, até porque, para os principais economistas anti-malthusianos (também chamados *neo-clássicos*), que dominavam o pensamento econômico, não se devia fazer nada para conter a expansão demográfica, pois esta promovia um vigoroso crescimento do consumo, portanto da produção e da economia como um todo. Pela óptica deles – que é de curto alcance – a capacidade de suporte dos territórios é irrelevante, como também o é a capacidade da biosfera, para absorver os resíduos, a poluição gerada, enfim, o “lixo” gerado. Para eles o crescimento da economia resolve todos os problemas.

Se as tendências das últimas 6 décadas permanecerem inalteradas – e se antes não sobrevier uma catástrofe, causada pela escassez de alimentos e de água – a população mundial deverá chegar a 7,5 bilhões em 2.020. A Divisão Populacional da ONU chegou a prever que ultrapassaria 10 bilhões em 2.050, entretanto constatou-se que os índices de natalidade tem caído nos últimos anos e aquelas estimativas foram revistas para baixo, prevendo-se que o patamar de estabilização será atingido em 2.050, com a população chegando a 9 bilhões, depois de passar pelos números indicado na tabela 13.

**Tabela 13 – Projeção da população mundial até 2.050**

ANO	2.010	2.020	2.030	2.050
<b>População</b> (bilhões)	6,8	7,5	8,1	9,0

Fonte: Divisão populacional da ONU

Nos últimos quinze a vinte anos, por força das crises do petróleo e da tomada de consciência, pela sociedade, dos danos ambientais provocados pelas emissões de gases de estufa, as idéias de Georgescu-Roegen e outros economistas ecológicos estão, aos poucos, voltando à tona, principalmente na Europa – pelo menos como tema para pesquisas importantes, integrando economia, engenharia, ecologia e políticas públicas.

Assim, o problema da explosão demográfica tem sido objeto de muitos estudos acadêmicos, principalmente em conexão com problemas ligados à fome e à proliferação de epidemias nos países mais pobres da África e da Ásia.

No Brasil, dos 9,93 milhões de habitantes recenseados no Primeiro Recenseamento Geral do Império, realizado em 1.872, a população chegou a 51,9 milhões, em 1.950. Em seguida – acompanhando a explosão demográfica mundial – subiu para 187,5 milhões em 2.008, como indica a tabela 14. Tal crescimento concentrou-se nas regiões metropolitanas, dando origem a sérios problemas de habitação, transportes, poluição atmosférica, saúde pública, saneamento básico e criminalidade – sem que se tenha adotado uma política consentânea de planejamento familiar.

Em algumas universidades e instituições de pesquisa brasileiras, particularmente no Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente do PPE/COPPE/UFRJ e no Departamento de Economia da FEA/USP (neste caso por iniciativa ainda não institucionalizada de alguns pesquisadores) as idéias de Georgescu-Roegen começam a ser objeto de estudos, que entretanto ainda são colocados no limbo pela corrente dominante do pensamento econômico.

**Tabela 14** – População brasileira, de 1.872 até o presente  
(em milhões de habitantes)

Ano	1.872	1.900	1.920	1.950	1.960	1.980	2.000	2.008
População	9,9	17,3	30,6	51,9	70,1	117,9	169,8	187,5

Fonte: IBGE

A história da energia no Brasil começou a mudar de rumo a partir da segunda guerra mundial. Até 1940, a principal fonte primária de energia do país era a lenha, que respondia por mais de 75% do consumo energético.

Depois da guerra, os processos de urbanização e industrialização e o conseqüente desenvolvimento dos transportes rodoviários induziram um rápido crescimento do consumo de energia, levando o país a implantar dois sistemas fundamentais, o elétrico – para alimentar as cidades, o setor de serviços e uma parte das indústrias, e o do petróleo e gás – para suprir os transportes e outra parte das indústrias.

Nas linhas a seguir apresenta-se uma síntese histórica das principais etapas da formação do sistema energético brasileiro.

Entre os primeiros registros de estudos de autores brasileiros sobre a importância da madeira como lenha e material de construção em geral podem ser citados os trabalhos de José Bonifácio de Andrada e Silva (“Memória sobre a necessidade e utilidade do plantio de novos bosques em Portugal” - Lisboa, Typ. da Academia de Ciências, 1.813); de Baltazar da Silva Lisboa (“Riquezas do Brasil em madeiras de construção e carpintaria” - Rio de Janeiro, Biblioteca Nacional, 1.823) e de Francisco Freire Alemão (“Breve notícia sobre a colleção de madeiras do Brasil” - Rio de Janeiro, Typ. Nacional, 1.867). No início de século XX surgiu,

em São Paulo, o nome de Navarro de Andrade, com o mérito de ter iniciado os reflorestamentos de grande escala, especificamente planejados para fornecer matéria prima florestal para as indústrias de celulose, além de lenha, dormentes e postes, para a Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Décadas depois veio, no plano federal, Luís Simões Lopes, que, em 1937, concretizou os antigos planos e recomendações de botânicos, geólogos e geógrafos, como Alberto Loefgren, José Hubmeyer e o Barão Homem de Mello, criando o primeiro Parque Nacional do Brasil, na Serra de Itatiaia (Carvalho, 1983).

O emprego do álcool para fins combustíveis e industriais já era estudado no início do século passado. Em 1922 foram realizadas, na Escola Politécnica, diversas experiências de uso de álcool em motores de ciclo Otto (Menezes, 1.980).

Na década seguinte foi criada a Comissão de Estudos do Álcool Motor (CEAM), para estudar a viabilidade do emprego do álcool como combustível e como aditivo para a gasolina que tinha entre os seus objetivos o de incentivar a produção de álcool em destilarias anexas às usinas instaladas pelo Estado, com a finalidade de equilibrar a oferta (e os preços) do açúcar, mediante o esmagamento de parte da cana para a produção de álcool.

Em 1.933 foi criado o Instituto do Açúcar e do Álcool – IAA, com a missão de regular e equalizar o mercado de açúcar, obrigando a que parte da cana fosse destinada à fabricação de álcool anidro.

Até o início dos anos 1.970, o álcool foi considerado um subproduto da indústria açucareira. Em 1973, com a crise do petróleo, ganharam impulso os estudos sobre o emprego do álcool como combustível complementar da gasolina. Em junho de 1.975 foi instituído o Plano Nacional do Álcool e, em novembro do mesmo ano foi criado o Programa Nacional do Álcool – Próálcool, tendo por objetivo a substituição, em larga escala, dos combustíveis derivados de petróleo, por álcool e, paralelamente, o apoio ao desenvolvimento de tecnologia adequada para a adaptação, ao álcool, dos motores Otto a gasolina, até então usado pelas montadoras de automóveis instaladas no Brasil (Menezes, *op.cit.*).

O Próálcool desenvolveu-se aceleradamente até meados da década de 1.990, com uma estrutura financeira dependente basicamente do governo (Petrobrás), já que os empresários privados não contribuíam para a criação de um modelo financeiro viável para as atividades de produção, transporte e distribuição de álcool, que fosse independente da Petrobrás. Ao contrário, o que se viu foi o setor produtivo definir sob o peso do sistema financeiro, que preferia financiar a rolagem da dívida pública a juros elevados e sem correr riscos, do que apoiar investimentos produtivos, industriais ou agrícolas, que envolvem riscos, como toda atividade empresarial produtiva que, de resto, só se pode viabilizar com juros muito inferiores

aos oferecidos pelo governo ao sistema financeiro privado. Assim, também aí os bancos privados atuaram como simples multiplicadores de ativos financeiros estéreis, e os bancos oficiais (BNDES, Banco do Brasil e bancos estaduais), com base em critérios nem sempre transparentes, dissiparam recursos em projetos tecnicamente mal definidos, particularmente no tocante à parte agrícola e à logística de transporte e distribuição do combustível produzido, elevando desnecessariamente os custos.

O aumento do preço da gasolina e, principalmente, a crescente conscientização do público em geral em torno dos problemas ligados às emissões de CO<sub>2</sub> e seus impactos sobre o clima, estão fazendo com que o setor alcooleiro readquira o vigor que teve quando foi criado o Proálcool. Parte desse vigor, entretanto, vem do interesse despertado pelos potenciais ganhos na exportação de álcool, sem que se analisem os impactos negativos que as monoculturas canavieiras provocarão, em médio e longo prazo, sobre o equilíbrio ecológico, com inevitáveis reflexos sobre a produção agrícola e, indiretamente, sobre o ciclo hidrológico.

No tocante ao petróleo, há registros históricos datando de 1864 dando conta da utilização de uma “lama preta oleosa” para iluminar residências, em Lobato, na Bahia.

Há, também, relatos sobre o que teria sido “o primeiro poço de petróleo” do Brasil, perfurado por um fazendeiro da região de Bofete, em São Paulo, em 1.897 (Informação disponível em <http://www.brasilescola.com/brasil/historia-do-petroleo-no-brasil.htm>).

A institucionalização das atividades de exploração de petróleo no Brasil data de 1.938, quando foi criado o Conselho Nacional do Petróleo – CNP, para avaliar pedidos de pesquisa e lavra de jazidas, e foram reguladas as atividades de refino, importação, exportação, transporte, distribuição e comercialização de petróleo e derivados. Por outro lado, ainda que não localizadas, as jazidas passaram a integrar o patrimônio da União. A indústria petrolífera brasileira propriamente dita só nasceu em 1.953, com criação da Petrobrás e a instituição do monopólio da União sobre as atividades de pesquisa, lavra, refino, transporte e distribuição de petróleo e derivados. Até então as decisões relativas ao petróleo, no Brasil, dependiam, direta ou indiretamente, de políticas traçadas pelas corporações internacionais do setor aqui estabelecidas (Esso, Shell, Texaco, etc.), que atuavam principalmente no segmento de distribuição de derivados. Graças aos investimentos da Petrobrás em pesquisa e lavra e, sobretudo, à tecnologia desenvolvida pela empresa para a exploração em águas profundas, o Brasil alcançou, em 2.006, a auto-suficiência na produção de petróleo.

Quanto à energia nuclear, sua história, no Brasil, remonta à década de 30, com a vinda de professores europeus para a Universidade de São Paulo, formando um núcleo do qual



originou-se a Secção de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras - FFCL, que deu origem ao atual Instituto de Física desta universidade.

Em 1.956 foi criado o Instituto de Energia Atômica - IEA, para onde foram transferidos inúmeros físicos da Secção de Física da FFCL e engenheiros da Escola Politécnica. Em 1.979, sob a forma de autarquia, o IEA passou à jurisdição da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo (atual Secretaria de Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia - SEICCT), com o nome de Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN. Atualmente este instituto é vinculado à Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN e segue diretrizes definidas por um Conselho Técnico-Administrativo - CTA, onde têm assento membros da diretoria executiva do próprio instituto, ao lado de representantes da USP, FIESP, SEICCT e CNEN. Para fins de ensino de pós graduação o IPEN continua ligado à USP (IPEN, <http://www.ipen.br/sitio/index.php?idm=3>).

Em 1.966 instituiu-se o Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA, junto à Escola Superior de Agricultura da USP, em Piracicaba.

Nas décadas de 40, 50 e 60 o governo federal criou, no Rio de Janeiro, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF (1.949), o Conselho Nacional de Pesquisas - CNPq (1.951), a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN (1956), o Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD (1.960) e o Instituto de Energia Nuclear - IEN (1.962). Em 1.953 criou-se em Belo Horizonte o Instituto de Pesquisas Radiológicas - IPR, ligado à Universidade Federal de Minas Gerais, posteriormente transferido para a extinta Nuclebrás e atualmente vinculado à CNEN, sob a denominação de Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear - CDTN.

Em 1.971, quando a CNEN e Furnas Centrais Elétricas receberam a incumbência de implantar a central nuclear de Angra I, contratada com a Westinghouse, criou-se a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear - CBTN, com a atribuição de planejar e implantar no país um programa de geração eletronuclear, em escala adequada para cobrir a demanda de energia elétrica, quando o potencial hidroelétrico estivesse plenamente aproveitado. Esta companhia foi extinta em 1.975, nascendo em seu lugar a Nuclebrás, já no clima das negociações que deram origem ao acordo nuclear com a Alemanha.

A nova empresa coordenou um programa que resultou na construção de uma fábrica de componentes pesados (NUCLEP) e e das centrais nucleares de Angra II e Angra III, sendo que esta não foi concluída (Carvalho, 1987).

Do início do século passado até meados da década 1.950 o sistema elétrico brasileiro foi controlado por grupos estrangeiros. Em 1.950 a capacidade total do sistema era de apenas

1.882 MW e os grupos controladores não se interessavam por investir em expansões, o que inviabilizava os processos de industrialização e substituição de importações que então ganhavam impulso. O empresariado industrial começou então a pressionar o governo, para que este assumisse o controle do sistema e o expandisse. Assim, a partir de 1.955, o Estado entrou no setor, investindo em sua modernização e estruturando-o sobre um conjunto de empresas públicas, que expandiram rapidamente sua capacidade, como indica a tabela 14.

**Tabela 15 - Sistema Elétrico Brasileiro**  
Capacidade instalada (MW)

Ano	<i>Hidráulica</i>	<i>Térmica</i>	Total
1.900	5	7	12
1.910	138	22	160
1.920	279	78	357
1.930	630	149	779
1.940	1.009	235	1.244
1.950	1.535	347	1.882
1.960	3.642	1.158	4.800
1.970	8.720	1.739	10.459
1.975	16.316	4.652	20.968
1.980	27.649	5.823	33.472
1.985	37.072	7.030	44.107
1.990	45.558	7.492	53.050
1.995	51.367	7.754	59.121
2.000	61.063	12.649	73.712
2.005	70.858	22.300	93.158

Fontes: Centro da Memória da Eletricidade e EPE (BEN - 2.006)

Essa evolução estimulou o desenvolvimento da tecnologia nacional nos campos da engenharia de centrais hidroelétricas, indústrias de material elétrico e componentes mecânicos e eletrônica de instrumentação e controle Consolidou-se assim no Brasil uma importante indústria de equipamentos eletromecânicos, criaram-se firmas de engenharia e de consultoria, além de órgãos de pesquisa e laboratórios ligados instituições públicas e a empresas privadas.

Nesse processo formaram-se engenheiros e técnicos qualificados nas áreas de projeto, construção e operação de usinas geradoras e sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

## 7 O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NO BRASIL

Antes da desregulamentação e reestruturação o planejamento de longo prazo e os programas anuais de investimento do setor energético brasileiro eram elaborados pela Eletrobrás, visando basicamente ao sistema elétrico. Era um planejamento voltado para a oferta, sem que as prioridades fossem atribuídas em função das efetivas necessidades da sociedade, mas sim para atender ao previsível crescimento do mercado, decorrente de projetos que poderiam consumir grandes blocos de energia. Partia-se da premissa de que, para se desenvolver, o Brasil deveria seguir, obrigatoriamente, a mesma trajetória consumista que seguiram os países que hoje são desenvolvidos, não se impondo restrições a projetos que desinteressantes para a qualidade de vida da população. Assim, o mercado era projetado pelo lado da oferta e a expansão do sistema era planejada sem que se questionasse a efetiva importância, para a sociedade, dos projetos que consumiriam a energia oferecida, nem mesmo quando a mesma era subvencionada. Não só o planejamento de longo prazo, mas também os programas anuais de investimento eram de responsabilidade do Grupo Coordenador de Planejamento do Sistema Elétrico - GCPS, coordenado pela Eletrobrás, que visava prioritariamente à expansão da oferta, não tendo nenhum interesse pela análise crítica das atividades econômicas nas quais seria utilizada a energia a ser gerada, muito menos por uma avaliação de sua real importância para o bem estar da sociedade que, afinal, deveria ser o objetivo permanente do planejamento.

Este viés conceitual ficou tão arraigado no espírito dos planejadores oficiais que, para eles, a energia – particularmente a eletricidade – seria um fim em si mesma, a tal ponto que, em seu jargão, os cenários de alto consumo eram denominados "cenários otimistas", embora, na realidade, além de implicarem maiores agressões ao meio ambiente, tais cenários exigissem grandes sacrifícios da sociedade, que acabava pagando por investimentos extemporâneos, na linha da antiga política “estalinista”, pela qual a produção de mais energia traz o desenvolvimento, não importando as finalidades para as quais essa energia é produzida, nem os seus custos sociais e ambientais.

A operação do sistema também ficava no âmbito da Eletrobrás, com o Grupo Coordenador da Operação Interligada – GCOI e o Comitê de Coordenação da Operação Norte-Nordeste - CCON. O GCPS, o GCOI e o CCON eram colegiados, nos quais tinham assento, com direito a voto, as principais concessionárias de energia elétrica do país. Tal organização atuava no sentido de fazer com que a expansão do sistema respeitasse o planejamento de longo prazo e as programações anuais de investimentos, o que favorecia o

aproveitamento otimizado das sinergias hidrológicas entre as diversas bacias fluviais, mantendo-se sob controle o risco de déficit de energia firme.

A geração e a transmissão eram operacionalmente integradas e articuladas, o que reduzia a necessidade de se recorrer a onerosos projetos termelétricos.

O órgão normativo e fiscalizador era o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, do Ministério de Minas e Energia, que também respondia pela outorga de concessões.

Com a desregulamentação, o sistema foi financeirizado e submetido às forças do mercado. Atribuiu-se à energia elétrica as características de uma *commodity*, e nada se fez para impedir a criação de um ambiente especulativo, no qual os valores reais das tarifas subiram a taxas bem superiores às do IGPM.

As principais funções do DNAEE passaram para a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, órgão que não tem poder político para arbitrar os conflitos que surgem nas relações entre os consumidores, de um lado; e os produtores, distribuidores e comercializadores de eletricidade, do outro. O GCOI e o CCON cederam lugar ao Operador Nacional do Sistema - ONS. E o GCPS foi substituído pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética, vinculada ao Ministério de Minas e Energia.

No modelo desregulamentado, tal como era no modelo controlado pelo estado, as concessões são atribuídas sem prévia análise de seus aspectos estratégicos. Um dos reflexos disso é que, nas licitações promovidas pela ANEEL, os melhores aproveitamentos hidrelétricos continuam sendo destinados a fabricantes de eletrointensivos, que exportam a preços artificialmente baixos, em média, cerca de 60% de suas produções, aqui deixando muita agressão ambiental, criando escassos e mal remunerados postos de trabalho e gerando uma receita cambial que não faz jus aos grandes blocos de energia subvencionada que consomem. Ou seja, a expansão do sistema permaneceu na dependência de iniciativas, freqüentemente conflitantes, de grandes consumidores privados e de empresas do governo ligadas à Eletrobrás (e, também à Petrobrás, cuja participação no setor elétrico tem crescido, por força do programa termelétrico a gás natural).

O planejamento dos setores de petróleo e gás natural era limitado à Petrobrás, tendo, portanto, caráter empresarial, desconsiderando o cenário mais abrangente, do país como um todo. Daí resultou, por exemplo, a estagnação do Programa Nacional do Alcool, em sua primeira fase.

Diante da evidência de que as crises dos combustíveis fósseis e do clima caminham para o agravamento, o planejamento estratégico integrado do setor energético ganha cada vez

mais importância, já sendo objeto de numerosos e importantes trabalhos de cunho acadêmico e governamental na maioria dos países ditos industrializados e em agências multilaterais, como a OCDE, a AIE, a OPEP, etc,

No Brasil, entretanto, as instituições dedicadas ao estudo das questões energéticas propriamente ditas perderam muito tempo com assuntos de cunho comercial, tarifário, mercadológico e regulatório – que sobrevieram com a desregulamentação dos setores de energia elétrica, petróleo e gás.

Os estudos especificamente energéticos estão sendo mais voltados para o aumento de oferta de energia, do que para o controle da demanda, sem considerar que aumentos de oferta estimulam crescimentos de consumo que colocam problemas no longo prazo, à semelhança do que ocorre no chamado *Paradoxo de Jevons*, quando ganhos de eficiência acabam por induzir o crescimento do consumo (Polimeni, 2006). Tais problemas poderiam ser evitados se a demanda começasse a ser racionalizada e contida desde já.

Com exceção de alguns trabalhos que vêm sendo realizados em instituições como a COPPE/UFRJ, a UNICAMP e o IEE/USP, entre outras - pouco se fez no tocante a estudos específicos sobre o emprego de fontes de energia abundantes nas diversas regiões do país, aplicáveis em programas de desenvolvimento integrado, a serem implantados gradativamente, ao longo das próximas décadas, respeitando as características fisiográficas, ecológicas, agrícolas e sociais; assim como a vocação industrial das diversas regiões. Faltam estudos básicos sobre a otimização do consumo de energia nos diversos modos de transporte de produtos da agropecuária, em função de zoneamentos agro-industriais, ecológicos e econômicos. Como se sabe, muitos desses produtos percorrem milhares de quilômetros, dos campos agrícolas até os pólos industriais, cuja produção, em boa parte, percorre, em seguida, caminhos inversos, para chegar aos distribuidores e consumidores. Em relação ao transporte de passageiros, raros são os estudos sobre o consumo de energia em função da extensão das regiões metropolitanas e dos padrões de urbanização. São tímidos os estudos sobre a viabilidade de se aproveitarem projetos de recuperação de antigos bairros degradados nas grandes cidades, com o objetivo de se criarem pólos administrativos, comerciais e residenciais estrategicamente situados, de modo a otimizar os transportes, para economizar energia e reduzir as emissões de gases de estufa. E faltam estudos visando à concepção de códigos de obras e posturas municipais que regulamentem e tornem obrigatória a adoção de técnicas arquitetônicas e de construção civil especificamente voltadas para a economia de energia nas residências e nos logradouros e edifícios públicos.

Começam, entretanto, a surgir iniciativas promovidas por empresas governamentais, como a Petrobrás e a EPE. Esta última divulgou recentemente o Plano Nacional de Energia 2.030, trabalho que tem o mérito de reunir e consolidar informações técnicas e projeções que poderão ser muito úteis para a formulação de um plano destinado a assegurar uma transição razoavelmente tranqüila entre a atual matriz, que é insustentável, para matrizes sustentáveis.

## 8 CENÁRIOS E TENDÊNCIAS

Como foi dito anteriormente, para demonstrar a tese, partimos do cenário do setor energético em 2.005 (BEN 2.006/2.005) e delineamos dois cenários alternativos para 2.030, um tendencial, que resulta do próprio Plano 2.030, da EPE, e outro praticamente sustentável (que chamamos **cenário ideal**), que poderá chegar muito próximo da sustentabilidade completa por volta de 2.050, quando a população brasileira estaria em aproximadamente 215 milhões de habitantes, segundo a Revisão da Projeção da População, do IBGE (IBGE, 2.008).

Admitimos que – com a demografia estabilizada e tendo alcançado um nível de qualidade de vida satisfatório – não mais será necessário aumentar o fluxo de produção física de bens e de energia. A partir daí o desenvolvimento dependerá essencialmente de avanços tecnológicos que propiciem ganhos de eficiência dos processos de produção e melhoria da qualidade dos bens produzidos. Como sugere Herman Daly (Daly, 2005), os ganhos de eficiência dos processos e os aperfeiçoamentos de qualidade dos produtos contribuem para aumentar o PIB, sem que seja necessário expandir a quantidade de recursos naturais empregados como matéria prima na produção, em escala incompatível com a capacidade do meio ambiente de renovar os recursos e reciclar o lixo, ou os rejeitos gerados.

É importante observar que, de acordo com a revisão da projeção feita pelo IBGE, a população crescerá até um máximo de aproximadamente 220 milhões de habitantes, por volta de 2.040 e, a partir daí, decrescerá até 2.050, quando deverá ficar num patamar de estabilização, em torno de 215 milhões de habitantes. Assim, chegando-se próximo à sustentabilidade energética em torno de 2.030, ficará aberto o caminho para alcançá-la e mantê-la de 2.050 diante, na medida em que mais problemático vá se tornando o uso de combustíveis fósseis – não apenas pelo esgotamento das reservas com as previsíveis consequências geopolíticas – mas, principalmente, pelos impactos ambientais provocados por sua combustão.

O cenário ideal baseia-se em considerações sobre as demandas setoriais que possam satisfazer às necessidades da sociedade, na medida da dotação de recursos naturais e das possibilidades da economia brasileira. Trata-se de um cenário de antecipação (*botton up*), cuja elaboração não resultou a projeção do cenário atual, mas sim da imagem de uma situação desejável no ano 2.030, descrita em função de um conjunto coerente de eventos plausíveis, que podem ocorrer, desde que se adotem estratégias adequadas. Naquela altura estaríamos usando praticamente apenas fontes renovais de energia, com as fontes não renováveis ocupando posições crescentemente marginais.

De resto, seria incoerente propor um modelo sustentável, tendo na matriz energética uma constante participação de combustíveis fósseis, que além de não serem renováveis, podem elevar a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera a níveis incompatíveis com a sustentabilidade.

A substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis exigirá o redirecionamento de algumas tendências consideradas pela EPE/MME na elaboração do Plano 2.030 e do Plano de Expansão da Energia 2.008 – 2.017, que levariam o país ao cenário tendencial, que é insustentável, como se mostra no item 8.2.

No Capítulo 9 “*Estratégias de transição para a sustentabilidade*” são discutidas possíveis estratégias visando a esse redirecionamento.

\* \* \*

Previsões baseadas em modelos econométricos são insatisfatórias, entre outros motivos porque os prazos considerados são longos; a conjuntura política é imprevisível e as condicionantes sócio-econômicas são geralmente instáveis, sobretudo nos dias de hoje, com o panorama internacional atravessando períodos de turbulência e a sociedade procurando novos modelos de convivência política e econômica.

O objetivo dos cenários do ano 2.030 não é o de prever o que vai acontecer naquele ano no campo da energia, mas apenas o de enriquecer a base de dados e facilitar a identificação dos pontos mais importantes.

Cabe, aqui, citar o Professor Douglass North (Prêmio Nobel de Economia de 1.993), para quem “Não existe maneira de se fazerem previsões de longo prazo que sejam inteligentes, até porque hoje não se conhece o que aprenderemos e saberemos no futuro, muito menos aquilo em que acreditaremos” (North, 1.999).

O desenvolvimento de uma sociedade resulta da interação entre tendências históricas e a ocorrência de eventos provenientes de decisões tomadas no presente.

Coerentemente com essa concepção, o planejamento por meio de cenários deve ter por objetivo a obtenção de dados e informações para que se possa interferir no curso dos acontecimentos, com a finalidade de passar de uma situação atual, concreta, para uma situação ideal, desejada, no futuro.

Uma vez definidos os objetivos futuros devem ser programados as ações e meios para alcançá-los. Parece claro que o Estado deve participar ativamente desse processo, porque as ações em causa implicam a passagem de modelos energéticos irracionais fortemente enraizados, para modelos baseados na otimização do consumo, em função das efetivas necessidades da sociedade, o que contraria costumes e interesses já sedimentados, tanto de



consumidores, como de produtores e comercializadores de energia. E contraria também o princípio geralmente tomado como dogma, de que o crescimento *à outrance* pode contornar os mais diversos problemas.

A este propósito, o Professor Douglass North observa que "Embora, em geral, os economistas neoliberais atribuam à não interferência do poder público e ao *laissez faire* o forte desenvolvimento das economias britânica na virada dos séculos XIX para XX, e norte-americana, durante o século XX, o fato é que, tanto na Grã Bretanha como nos Estados Unidos o mercado é estruturado e controlado por governos fortes, para que a competição se faça por preço e qualidade, e não pela eliminação de concorrentes..." (North, *op. cit.*).

Isso deveria ser ainda mais válido em países em que as instituições são frágeis, a imprensa é influenciada pelo poder econômico, e a sociedade ainda não é suficientemente educada. No Brasil, em particular, seria ilusório esperar que os processos produtivos e a forma pela qual se consome energia possam ser modificados somente pela ação das forças do mercado. Por conseguinte, para que se alcance o cenário ideal, deverá haver uma efetiva participação do Estado nas decisões do setor econômico.

## 8.1 O cenário atual (2005/2006)

Como foi assinalado no capítulo 2, o setor energético é parte integrante do complexo político-econômico-social, portanto sua configuração e os rumos de sua evolução dependem de fatores técnicos diretamente relacionados à energia e também aos setores político, econômico e social. Portanto, para descrever o cenário atual, vamos examinar os aspectos mais relevantes da conjuntura do país, como um todo.

Começando pela economia, constata-se que a política monetária é orientada em função de investimentos financeiros não produtivos, em prejuízo de investimentos produtivos (Carvalho *et all*, 2.006). Para pagar os elevados juros estabelecidos nessa política, o governo aplica uma carga tributária da ordem de 38% do PIB. O prejuízo daí resultante aparece nas contas públicas: em 2.005, foram pagos cerca de R\$ 157 bilhões de juros da dívida pública (R\$ 430 milhões por dia), o que equivale a cerca de 8,1 % do PIB daquele ano. Enquanto isso as infra-estruturas de transporte e energia se deterioram ou ficam estagnadas e faltam recursos para o desenvolvimento de tecnologias eficientes para a indústria e para as fontes renováveis de energia.

Cerca de 85% da eletricidade brasileira provém de potenciais hidráulicos, cujo aproveitamento é renovável e menos agressivo ao meio ambiente do que as alternativas disponíveis.

A privatização de grande parte do setor revelou-se estrategicamente equivocada, pois, anteriormente, grande parte da receita era reinvestida na modernização e expansão do próprio sistema, que funcionava e produzia normalmente. O sistema não era concentrador de renda e não remetia lucros ao exterior. Com as privatizações, o sistema entrou em crise, porque os novos donos das antigas estatais não investem o suficiente na expansão do sistema, pois isso conflita com o objetivo empresarial de maximizar lucros, o que pode ser feito mais facilmente cortando-se os investimentos e aumentando-se as tarifas.

**Tabela 16** - Aumento da tarifa média no Brasil, entre 1.995 e 2.007

Ano	1.995	1.999	2.007	$\Delta$ IPCA <sub>95/07</sub>	$\Delta$ TAR <sub>95/07</sub>
Tarifa (R\$/MWh)	88	115	242	109%	275%

Fontes: MME e ANEEL

Nota - Os valores indicados representam as médias ponderadas das tarifas dos setores residencial, comercial e industrial.

A tabela 16 mostra que, nestes últimos anos, as tarifas subiram 275% enquanto, segundo o IBGE, de janeiro de 1.995 a janeiro de 2.007 a inflação referida ao IPCA foi de

109%. Esta é uma das conseqüências da eliminação do conceito de serviço público, baseado no “serviço pelo custo”, foi substituído por um regime de tarifas pelo preço de mercado

Note-se que as tarifas eram baixas porque a idade média do parque hidroelétrico brasileiro aproxima-se dos trinta anos, portanto seu valor contábil (que é o principal componente das tarifas de eletricidade, como se mostra no Apêndice C) já está muito reduzido. Daí resulta uma incidência diminuta do capital sobre os custos de geração, o que permitia que se compusesse um *mix* de tarifas de suprimento que dava, às distribuidoras, margem para cobrar tarifas de fornecimento acessíveis até para as populações de baixa renda.

Agora as tarifas são formadas no mercado, para assegurar lucros, não apenas às geradoras, mas também às empresas comercializadoras e outros intermediários. Por força disso, inúmeros consumidores residenciais têm dificuldades para pagar as novas tarifas, aumentando os índices de inadimplência e de perdas técnicas causadas por ligações clandestinas.

Se persistirem essas tendências, ficará ameaçada a sobrevivência de pequenas e médias indústrias, com os conseqüentes impactos no campo social.

No tocante ao petróleo – diante da perspectiva de esgotamento das reservas mundiais por volta de meados deste século – foi um equívoco leiloar e abrir à exploração estrangeira, vastos campos já prospectados pela Petrobrás.

A falta de planejamento estratégico ficou patente no programa das termelétricas a gás: cedendo a pressões de grupos interessados em explorar o gás natural da Bolívia (que encontraria no Brasil o único mercado consumidor de escala atraente), o governo relegou ao segundo plano o programa hidroelétrico, transferindo a prioridade para as termelétricas.

Com as termelétricas, os grupos que controlavam as reservas de gás da Bolívia ficaram em posição estrategicamente muito forte para estabelecer os preços de venda do gás para as termelétricas brasileiras.

Esta situação agravou-se recentemente, com o governo boliviano nacionalizando a exploração de seus recursos naturais.

***Ciência e tecnologia*** – Os empresários industriais brasileiros encaram os gastos em pesquisa industrial, inovação tecnológica e aperfeiçoamento de recursos humanos como custo, não como investimento, como seria lógico.

Na verdade, não há investimento mais rentável do que em pesquisa científica, inovação tecnológica e aperfeiçoamento de pessoal: calcula-se que, nos países industrializados, cerca de 65% do estoque de capital existente nos ativos das empresas é

capital humano, ou seja, pessoal especializado, treinado e detentor de *know how*. (Carvalho *et al*, 2006)

No comércio internacional, os produtos de alto conteúdo tecnológico preenchem, na média mundial, cerca de 30% das pautas de exportações, mas o Brasil tem uma balança negativa de exportações assim classificadas. E sem pessoal qualificado, não se pode substituir, por produção local, as importações tecnologicamente avançadas.

***O agronegócio, as monoculturas e a agricultura familiar*** – Na falta de diretrizes estratégicas que levem em conta possíveis impactos ambientais, sociais e intersetoriais, o governo concede subsídios às monoculturas voltadas para a exportação. Em vez de expandir indiscriminadamente as exportações de soja, madeira, minérios, etc., dever-se-ia estudar a viabilidade das exportações de produtos de alto conteúdo tecnológico.

O agronegócio avança desordenadamente essencialmente porque a política de meio ambiente do governo federal, que engloba as políticas ambientais de diversos setores (petróleo, energia elétrica, águas, florestas, fauna, etc.) carece de objetivos bem definidos.

As *plantations* de exportação e as florestas industriais, por exemplo, deveriam ficar em áreas delimitadas com base em minuciosos estudos de zoneamento agro-ecológico, porém, exceto em alguns estados – e assim mesmo parcialmente – tais zoneamentos ainda não foram feitos.

- **Tendências constatadas no atual cenário**

As decisões do governo são influenciadas por pressões de setores eletrointensivos de exportação, tendência cujo objetivo prioritário é o de aumentar a oferta de energia segundo hipóteses de crescimento incompatíveis não apenas com objetivos do Plano Nacional de Mudanças Climáticas, referentes às emissões de CO<sub>2</sub>, mas com a própria sustentabilidade, em sentido lato. Esta tendência é visível no Plano Nacional de Energia 2.030.

O economista Rodrigo Ávila abordou essas questões de forma pragmática: “a entrada de dólares através da exportação de produtos básicos, financia a fuga de capitais pela via financeira. O superávit da balança comercial está financiando os capitais especulativos e o fluxo comercial está financiando remessas de divisas. O país está sendo transformado num mar de soja, eucalipto, exploração minérios (*com a conseqüente*) depredação ambiental, para financiar a saída de divisas” (Ávila, 2009).

Essas tendências levariam o país ao cenário tendencial, descrito no item 8.2.

As tabelas 17 e 18 apresentam os atuais perfis de consumo de energia, por fonte e por setor e a tabela 19 apresenta informações complementares relevantes.

**Tabela 17** – Atual perfil do consumo de energia, por fonte

<b>Fontes</b>	<b>%</b>
<b>Não renováveis</b>	<b>55,6</b>
Petróleo e derivados	42,7
Gás natural	6,8
Carvão mineral + coque	4,9
Urânio	1,2
<b>Renováveis</b>	<b>44,4</b>
Energia hidráulica	14,8
Lenha e carvão vegetal	11,4
Produtos de cana de açúcar	14,5
Outras	3,7
<b>Consumo total (10<sup>6</sup>tep)</b>	<b>195,9</b>

Fonte: EPE - BEN 2.006/2.005

**Tabela 18** – Perfil do consumo atual, por setor

<b>Setor</b>	<b>10<sup>6</sup>tep</b>	<b>%</b>
<b>Industrial</b>	<b>73,5</b>	<b>37,5</b>
<b>Transportes</b>	<b>52,5</b>	<b>26,8</b>
<b>Residencial</b>	<b>21,8</b>	<b>11,1</b>
Comercial e serviços	8,9	2,8
Agropecuário	8,4	4,3
Setor público	3,5	1,8
Setor energético *	17,6	8,9
Não energético, etc.	9,7	4,9
<b>Consumo total</b>	<b>195,9</b>	<b>100,0</b>

\* Centros de transformação + atividades de extração e transporte interno de produtos energéticos.

Fonte: EPE - BEN 2.006/2.005

Consumo de energia, *per capita*:  $\sim 1,05 \times 10^3$  tep/hab $\times$ ano

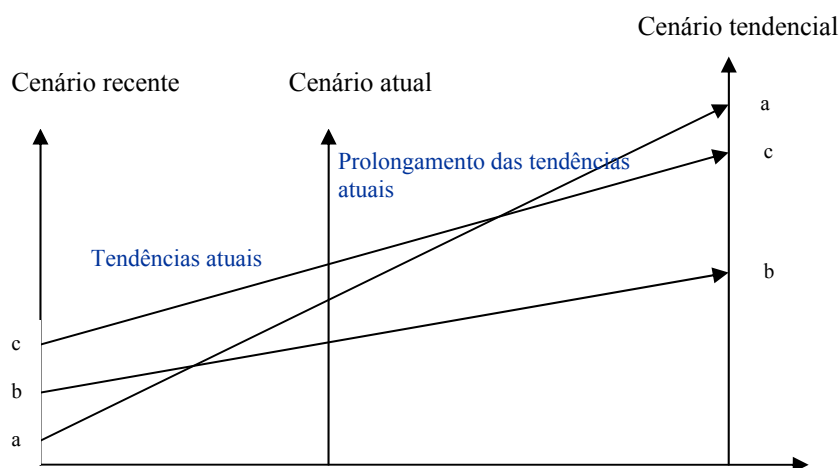
**Tabela 19** – Informações complementares sobre o cenário atual

- População: aproximadamente 187 milhões de habitantes.
- Taxa de urbanização: 84%
- População economicamente ativa (PEA): aproximadamente 90 milhões.
- Desempregados: aproximadamente 9 milhões.
- Subempregados: aproximadamente 12 milhões.
- PIB: aproximadamente US\$ 1.067 bilhões (Câmbio médio em 2.006: R\$/US\$  $\sim$ 2,2)
- Taxa de crescimento do PIB no ano de 2.006: 3,7%
- Taxa de investimento em capital fixo: 16,5%
- PIB *per capita*: cerca de US\$ 5.715 (os 40% mais pobres têm US\$ 620 e os 10% mais ricos têm US\$ 21.880).

Fontes: IBGE e BACEN

## 8.2 O cenário tendencial em 2.030

Se permanecerem as tendências acima apontadas, o cenário deverá ser aquele previsto pela EPE, no Plano 2.030. As bases macroeconômicas desse plano assentam na premissa de que, no período considerado, a economia mundial poderá evoluir em três direções alternativas, com taxas de crescimento de 3,8%; 3,0% e 2,2%, respectivamente, segundo as condicionantes geopolíticas. A EPE admitiu que o Brasil alcançará taxas mais elevadas do que as taxas mundiais e analisou quatro alternativas (sendo que duas são intermediárias), elegendo como mais plausível a de que a economia brasileira seguiria a mesma tendência constatada entre 1.971 e 2.002, período em que sua taxa média de crescimento foi de 4,1% ao ano (esta alternativa foi designada pela EPE como “Cenário B1 – Surfando a Marola”). A figura 7 esquematiza a construção deste cenário.



**Figura 7** - Construção do cenário tendencial

A EPE supôs que os gargalos infra-estruturais serão reduzidos; que a produtividade global da economia estará entre média e alta; que haverá ganhos de competitividade em alguns setores; que a distribuição de renda será mais uniforme e que o PIB *per capita* crescerá a ~3,1% ao ano. O Plano Decenal de Expansão da Energia do MME/EPE segue as linhas do Plano 2.030, prevendo que o consumo de energia elétrica crescerá a uma taxa de 4,8% ao ano até 2.017 e propondo que a capacidade instalada passe dos atuais 99.700 MW, para 154.700 MW em 2.017, com uma diminuição relativa da geração hidráulica, que cairá dos atuais 86%, para 76 %.

Se ficar em 3,5% ao ano a taxa de crescimento do consumo de energia, como prevê o Plano 2.030, as dificuldades provocadas pelos conflitos geopolíticos associados às crescentes dificuldades na exploração das reservas mundiais de combustíveis fósseis, autorizam a previsão de que, sob acirradas disputas internacionais, os recursos energéticos do país não

serão suficientes para sustentar um modelo baseado no crescimento do PIB previsto no referido plano (Ver Apêndice A). Isto para não falar dos problemas ambientais provocados pelas emissões de CO<sub>2</sub>, se as reservas da Província do Pré-Sal forem efetivamente confirmadas e exploradas.

Em outras palavras, não se pode compatibilizar as taxas de expansão adotadas pela EPE no Plano 2.030, com as fontes de energia disponíveis, nem com os requisitos de diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>.

Em outras palavras, **o cenário tendencial é insustentável.**

As tabelas 20 e 21 apresentam os perfis de consumo de energia, por fonte e por setor, previstos pela EPE no Plano 2.030 e a tabela 22 apresenta projeções do IBGE, EPE e BACEN, referentes à economia e à demografia.

**Tabela 20** – Perfil do consumo de energia por fonte, em 2.030

Fontes	%
<b>Não renováveis</b>	<b>55,0</b>
Petróleo e derivados	38,0
Gás natural	8,0
Carvão mineral	7,0
Urânio	2,0
<b>Renováveis</b>	<b>45,0</b>
Energia hidráulica	22,0
Lenha e carvão vegetal	8,0
Produtos de cana de açúcar	14,0
Biodiesel	2,0
Outras	6,0

Fonte: EPE – Plano 2.030.

**Tabela 21** – Perfil do consumo, por setor, em 2.030

Setor	10 <sup>6</sup> tep	%
<b>Industrial</b>	<b>179,7</b>	<b>44,0</b>
<b>Transportes</b>	<b>139,0</b>	<b>34,0</b>
<b>Residencial</b>	<b>41,7</b>	<b>10,2</b>
Comercial e serviços	27,1	6,6
Agropecuário	21,4	5,2
<b>Consumo total</b>	<b>408,8</b>	<b>100,0</b>

Fonte: EPE

**Tabela 22** - Cenário tendencial em 2.030 – Informações complementares

População: ~ 220 milhões de habitantes (Projeção do IBGE); Taxa de urbanização: ~ 87%  
 População economicamente ativa (PEA): ~ 106 milhões; Desempregados: ~ 8 milhões;  
 Subempregados: ~ 15 milhões; PIB: ~ US\$ 2.914 bilhões (Observações:  
 1<sup>a</sup> - US\$ de 2.005; 2<sup>a</sup> - taxa média de crescimento do PIB entre 2.005 e 2.030 = 4,1% ao ano);  
 PIB *per capita* em 2.030: cerca de US\$ 13.243. Fontes: IBGE, EPE e BACEN

## 9 ESTRATÉGIAS DE TRANSIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE

Energia é indispensável para fazer produzir os diversos setores da economia, na medida suficiente para satisfazer às necessidades básicas da sociedade, isto é, alimentação, educação, habitação, vestuário, transportes, conforto, cultura e lazer. Por conseguinte, a expansão da oferta de energia deve ser planejada em função do previsível consumo de projetos cuja produção se destine a atender a essas necessidades.

No Brasil, entretanto, parte-se da premissa de que o desenvolvimento do país depende diretamente do aumento da produção de energia, daí resultando que o principal objetivo da política governamental para o setor energético seja a expansão da oferta.

É esta a orientação que prevalece no Plano 2.030 e no Plano Decenal de Energia, da EPE/MME. Não se questionam as finalidades para as quais a energia é produzida, nem a importância, para a sociedade, de projetos claramente insustentáveis, por consumirem grandes blocos de energia, ou por agredirem irreversivelmente o meio ambiente, de modo que o objetivo desses planos é o de produzir mais energia, independentemente dos impactos ambientais e ônus sociais – quando o correto seria procurar meios de usar a energia disponível com mais eficiência e de maneira mais proveitosa para a sociedade. Desconsidera-se o fato de que aumentar diretamente a oferta de energia estimulará ainda mais o crescimento de consumo, colocando, no futuro, problemas que poderiam ser evitados se a demanda começasse a ser racionalizada e contida a partir do presente.

No livro *The Coal Question*, publicado em 1.865 J.W. Jevons já tinha observado que, no curto prazo, os aumentos de oferta (decorrentes de melhorias de eficiência) podem promover diminuições de consumo, mas, no longo prazo, provocam aumentos. Não é por outro motivo que, apesar dos avanços tecnológicos e da melhoria da eficiência dos processos produtivos, o consumo de recursos naturais vem crescendo exponencialmente desde meados de século XIX, fenômeno que ficou conhecido como Paradoxo de Jevons (Polimeni, 2.006).

Uma recente constatação do Paradoxo de Jevons (ou “Efeito Rebote”) foi a explosão das vendas de veículos *Off Road*, equipados com modernos e eficientes (porém superdimensionados) motores, estimulada pela decisão das “Sete Irmãs” de usar estoques estratégicos para baixar preços e expandir as vendas de petróleo.

Todos os *inputs* que alimentam os processos econômicos são extraídos do meio ambiente e a energia não é exceção. A extração de recursos não renováveis é por definição um processo irreversível, portanto qualquer aumento de oferta de energia proveniente de fontes não renováveis tais como petróleo, gás e urânio compromete a sustentabilidade.



Portanto, a **estratégia de transição para a sustentabilidade** deve ser voltada para a melhoria das condições de vida da população, não para o aumento do consumo de energia.

Não há razão objetiva para que a capacidade do sistema seja superior à necessária para cobrir a demanda total. Pelo mesmo motivo, a taxa de expansão do sistema não precisa exceder a taxa de expansão da demanda da sociedade.

Por isto, sociedades demograficamente estabilizadas, que já tenham alcançado níveis de qualidade de vida consensualmente considerados satisfatórios, não precisam consumir quantidades crescentes de energia para manter uma alta qualidade de vida – podem até consumir menos, por meio da racionalização de seus modelos energéticos e do aproveitamento de avanços tecnológicos nos processos de geração de energia e nos equipamentos e sistemas que a consomem.

Para que as necessidades da sociedade sejam atendidas de forma sustentável, devem-se empreender ações a serem tomadas do lado da demanda, destinadas a modular o perfil de consumo de energia, com o objetivo de reduzi-lo, a fim de colocá-lo na medida da disponibilidade de fontes renováveis de energia disponíveis no país, sem comprometer a melhoria da qualidade de vida da população, ao contrário, contribuindo para melhorá-la, pela redução das agressões ao meio ambiente. Só então, com base na demanda assim estimada, deve-se planejar a oferta, tendo em conta, especialmente, os graus entrópicos das fontes primárias escolhidas.

Nos itens a seguir (9.1 - O lado da demanda e 9.2 - O lado da Oferta) vamos analisar, em linhas gerais, algumas possíveis estratégias voltadas para a modulação da demanda e para a otimização da oferta de energia, destinadas a tirar o melhor partido das fontes primárias de energia disponíveis no país, com vistas à sustentabilidade.

## 9.1 O lado da demanda

As demandas da sociedade vêm de necessidades elementares, como alimentação, educação, habitação, vestuário, transportes, conforto, lazer e outras. Evidentemente, o atendimento a essas necessidades requer energia.

Enquanto não existam indicadores mais aperfeiçoados, pode-se admitir, em primeira aproximação, que a qualidade de vida reflita-se no consumo de eletricidade *per capita*. Esta aproximação poderá ser refinada quando estiverem em condições de aplicação os Índices de Desenvolvimento Humano Sustentável, IDHS, propostos no capítulo 3 “O conceito de desenvolvimento sustentável”. Por enquanto, faremos estimativas do que deveria ser o consumo de energia elétrica *per capita*, suficiente para que o Brasil atinja, em 2.030, um nível de qualidade de vida comparável ao da média de países da Europa Ocidental, como Espanha, Itália, Grã Bretanha, e Portugal, que estão classificados, respectivamente, nos 16º, 19º, 21º e 33º lugares da lista de indicadores de desenvolvimento humano, do PNUD.

Para isto vamos recorrer à revisão da projeção da população brasileira, divulgada em novembro de 2008 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, na qual se constatou que a mesma deverá passar por um máximo de aproximadamente 220 milhões em torno de em 2039/2040 e a partir daí decrescerá lentamente, estabilizando-se torno de 215 milhões de habitantes, por volta de 2050. A tabela 22 apresenta esta projeção.

**Tabela 22** – Revisão da Projeção da População brasileira

Ano	População (milhões)
2.008	189,6
2.020	209,9
2.030	215,8
2.040	219,2
2.050	215,3

Fonte: IBGE, 2.008

Vamos agora estimar a demanda total de energia elétrica, gerada pela necessidade de que, em torno de 2.030, a população brasileira apresente um consumo *per capita* semelhante ao da média dos países da Europa Ocidental acima referidos, satisfazendo assim, em primeira aproximação, a condição que assumimos como idicadora de um nível de qualidade de vida comparável ao daqueles países.

Pela tabela 22, vemos que, em 2.030 a população brasileira deverá estar em cerca de 115,8 milhões de habitantes, devendo ainda crescer até chegar a um máximo de

aproximadamente 220 milhões, em 2.040. Para ficar do lado conservador, vamos fazer as nossas estimativas com vistas à população máxima, isto é, 220 milhões de habitantes.

A tabela 23 mostra o consumo de energia elétrica *per capita* na Espanha, Itália, Grã Bretanha, e Portugal e a respectiva média, assim como o consumo no Brasil, em 2.007. É importante notar que, em alguns países europeus, o aquecimento de ambientes responde por cerca de 15% a 20% do consumo de energia.

**Tabela 23** - Consumo de eletricidade *per capita* na Europa e no Brasil, em 2.007

PAÍS	CONSUMO kWh/hab×ano
Espanha	5.835
Reino Unido	5.774
Itália	5.400
Portugal	4.585
Média	5.398
Brasil	2.117

**Fonte:** [http://www.nationmaster.com/graph/ene\\_ele\\_con\\_percap-energy-electricity-consumption-per-capita](http://www.nationmaster.com/graph/ene_ele_con_percap-energy-electricity-consumption-per-capita)

No caso da França, em particular, a calefação elétrica responde por cerca de 36% do consumo no setor residencial, motivo pelo qual não incluímos este país em nosso paradigma (Hausse de la consommation d'électricité en France, 2007), pois o Brasil está praticamente todo em clima sub-tropical, de modo que a calefação de ambientes não é necessária.

Embora o consumo agregado de eletricidade exerça influência sobre a qualidade de vida, uma vez que há indústrias e estabelecimentos comerciais que contribuem para isso, é evidente que o consumo *per capita* no **setor residencial** seria um indicador mais direto.

A tabela 24 apresenta a evolução do consumo de eletricidade por setor, entre 1.995 e 2.005, na média dos países da União Européia, nos quais a qualidade de vida é tida como elevada e pode ser tomada como objetivo a ser alcançado pelo Brasil.

**Tabela 24** – União Européia - consumo final de eletricidade, por setor

Consumo → Ano↓	Total (TWh)	Industrial (%)	Residencial (%)	Serviços e outros (%)	%
1.995	2.250	39	28	33	100
2.000	2.500	41	27	32	100
2.005	2.750	41	29	30	100

**Fonte:** European Environment Agency – Environment Report 2.008

Como se vê, o consumo residencial é uma função praticamente constante do consumo total agregado, mantendo-se em torno de 27% a 29% deste, ao longo do tempo, de modo que o **consumo agregado per capita** reflete com boa aproximação o **consumo residencial per**

*capita*. Considerando-se coeficiente da tabela 24, calcula-se que o consumo **residencial** médio *per capita* nos países da União Européia tem ficado em cerca de 1.565 kWh/hab×ano. E como a população daquele bloco varia a taxas muito baixas, depreende-se que, no caso da eletricidade, a relação entre consumo total e consumo *per capita* tende a permanecer válida.

No caso brasileiro, tomando-se por base a população máxima projetada pelo IBGE, que será de 220 milhões de habitantes, multiplicando-a pelo consumo **residencial** *per capita* médio dos países europeus incluídos na tabela 23 e admitindo que esse consumo represente 29% do total, vê-se que o consumo total de energia elétrica no Brasil deveria ser da ordem de  $1,18 \times 10^9$  MWh/ano, a fim de que a população tivesse a um nível de qualidade de vida satisfatório. Enfatizamos que esta é uma aproximação rudimentar, que foi feita pelo máximo, pois não se considerou que o desenvolvimento científico-tecnológico certamente propiciará ganhos de eficiência nos centros de produção de energia, bem como nos processos produtivos e nas formas de uso da energia em todas as suas aplicações. Não se consideraram também as condições climáticas do Brasil, particularmente no que diz respeito à iluminação natural (horas por dia) e à temperatura média, que dispensa onerosos sistemas de climatização de ambientes na maior parte do país. Na medida em que forem surgindo mais estudos quantitativos sobre as implicações entrópicas das formas de produção e uso da energia elétrica, a demanda poderá ser estimada com mais precisão, visando à qualidade de vida da população e sem comprometimento à sustentabilidade. No tocante ao petróleo uma comparação análoga perderia significado, pois, no Brasil, o consumo de petróleo no setor residencial pouco influi sobre o consumo total, devido a substanciais diferenças de costumes nas residências e nos diversos setores produtivos e, **principalmente**, no número de automóveis *per capita*. Seja como for, a tabela 25 apresenta o consumo *per capita* de petróleo no Brasil e nos referidos países.

**Tabela 25** - Consumo de petróleo *per capita* na Europa e no Brasil, em 2.007

PAÍS	CONSUMO tep/hab×ano
Espanha	1,99
Reino Unido	1,46
<u>Itália</u>	1,46
<u>Portugal</u>	1,41
<u>Média</u>	<u>1,58</u>
Brasil	0,62

Fonte: [http://www.nationmaster.com/graph/ene\\_oil\\_con\\_percap-energy-oil-consumption-per-capita](http://www.nationmaster.com/graph/ene_oil_con_percap-energy-oil-consumption-per-capita)

O consumo médio de combustíveis (derivados de petróleo ou sucedâneos) *per capita* dos países em causa (1,58 tep/hab×ano) seria excessivo para o Brasil, pois, como foi dito

anteriormente, por força do desenvolvimento tecnológico, das diferenças climáticas e do gradativo abandono dos modismos consumistas decorrente da conscientização da sociedade relativamente às questões climáticas, o Brasil não deverá seguir o mesmo caminho *energy intensive* que foi seguido pelos países que hoje são desenvolvidos, de modo que o consumo de combustíveis não precisa acompanhar os padrões daqueles países.

### **Estratégias para a modulação da demanda de energia**

Pela tabela 26, que mostra o perfil do consumo energético setorial final em 2.006, vê-se que os setores que mais consomem energia são o industrial, o de transportes e o residencial.

Vamos individualizar, nesses setores, os segmentos que mais consomem energia, para, dentre eles, eleger aqueles em que a racionalização e modulação dos perfis de consumo dependa essencialmente de políticas regulatórias e decisões tomadas pelo governo em consenso com empresariado produtivo.

**Tabela 26.** Perfil do consumo setorial de energia no Brasil, em 2.006

<b>Setor</b>	<b>Consumo (tep)</b>	<b>%</b>
<b>Industrial</b>	76.757	<b>39,4</b>
<b>Transportes</b>	53.270	<b>27,4</b>
<b>Residencial</b>	22.090	<b>11,3</b>
Comercial	5.631	2,9
Agropecuário	8.550	4,4
Setor público	3.453	1,8
Setor energético	18.823	9,6
Outros	6.118	3,2
<b>Total</b>	<b>194.692</b>	<b>100,0</b>

Fonte: EPE - BEN 2.007

Em seguida vamos abordar, de passagem e apenas qualitativamente, alguns setores em que a demanda por energia possa ser reduzida, com vantagem para o meio ambiente e sem prejuízo da qualidade de vida da população. O tratamento quantitativo da demanda de energia nos setores abordados ultrapassa o objetivo desta tese. Cada um, por si, deveria constituir tema para uma nova tese, para que, aos poucos, se fosse formando a indispensável base de dados para o planejamento energético, visando à sustentabilidade.

- **O setor industrial**

Este setor responde pela maior parte do consumo de energia. Para se reduzir este consumo seria importante que se implantasse um modelo de planejamento integrado para os setores energético e industrial.

No Brasil, para se gerar US\$ 1,00 de produto, gasta-se em média 0,50 kWh de eletricidade. Algumas indústrias, como a de ferroligas, usam cerca de 10 kWh para agregar US\$ 1,00 ao PIB. No setor terciário se gasta, em média, apenas 0,20 kWh, para se oferecer US\$ 1,00 de serviço (Alvim, 2001).

Uma forma pragmática para se integrarem os planejamentos energético e industrial seria o emprego de parâmetros que possam aferir a real importância, para a sociedade brasileira, das atividades industriais que consomem energia em larga escala. Com essa finalidade, particularmente esclarecedores seriam parâmetros tais como a criação de empregos permanentes e o valor da produção, por unidade de energia consumida. Estes parâmetros seriam bons indicadores da utilidade pública dos projetos industriais. Em função dessa utilidade é que lhes seria atribuída a respectiva prioridade, para receber incentivos ou desestímulos do poder público. Naturalmente, todo o processo deve ser objeto de ampla consulta à sociedade, através de mecanismos transparentes, que tornem visíveis os benefícios e os custos de cada projeto, inclusive os ambientais.

No tocante à eletricidade, a tabela 27 – que foi preparada em 1.982, mas ainda indica, **em termos relativos**, os valores dos parâmetros empregos/energia e valor agregado/energia, tomando a média dos Estados Unidos e Canadá, e de alguns países europeus, como a França, Bélgica, Itália, Alemanha, Holanda e Grã Bretanha. A análise desta tabela sugere que uma estratégia eficiente para se diminuir a elasticidade *energia/produto* (com o objetivo de valorizar a energia e reduzir os impactos ambientais provocados por sua produção e consumo) seria a de se incentivarem projetos que apresentem altos coeficientes de valor da produção por unidade de eletricidade consumida e desestimular o oposto, sem deixar de lado os programas de conservação de energia.

**Tabela 27** - Empregos e produção *versus* eletricidade consumida

SEGMENTO INDUSTRIAL	Nº de empregos/GWh	US\$/kWh
Texteis e confecções	117	1,4
Indústria madeireira	112	2,0
Mecânica (máquinas, equipamentos)	111	2,7
Alimentos e bebidas	60	1,9
Celulose, papel e papelão	40	0,9
Prod. de min. não metálicos	30	0,7
Química	16	0,6
Metalurgia (ferro,aço,alumínio,etc.)	12	0,3

**Fonte:** Ramos, 1982

A demanda por energia elétrica deve provir das necessidades básicas da sociedade (consumo das famílias, escolas, hospitais, laboratórios e instituições de pesquisa científica e tecnológica, iluminação pública, etc). Para atender a essas necessidades, é necessário fornecer

eletricidade para uma grande variedade de pequenas e médias indústrias e algumas indústrias de grande porte, todas elas essenciais para a qualidade de vida da população, destacando-se as de alimentos, tecidos e confecções, construção civil, editorial e gráfica, etc. Depois viriam as indústrias de base, que produzem insumos para essas indústrias.

Para fornecer eletricidade gerada em usinas hidrelétricas – cuja geração, além de ser mais barata, provoca menores impactos ambientais – dever-se-ia dar prioridade às demandas dos serviços públicos e de setores essenciais para a qualidade de vida da sociedade.

É certo que as indústrias de base são importantes para atender a essas demandas, portanto elas também devem receber eletricidade. E, entre essas indústrias de base estão, além muitas outras, as de metais ferrosos e não-ferrosos, em particular a de alumínio. Ocorre que a produção de alumínio é altamente eletro-intensiva: consomem-se cerca de 15.000 kWh para produzir uma tonelada de alumínio.

Por outro lado, segundo a ABAL, atualmente (2.008) no Brasil são produzidas cerca de  $1,66 \times 10^6$  toneladas de alumínio por ano, das quais 55% destinam-se ao consumo interno e 45% ( $1,07 \times 10^6$  toneladas) são exportadas em forma primária. A isto devem ser acrescentadas as exportações de semi-acabados. Ainda segundo a ABAL, a indústria do alumínio participa, em regime de autoprodução, em 38% do próprio consumo de eletricidade. Ocorre que esta participação vem de usinas hidrelétricas, que em vez de operarem para atender a mercados cativos, deveriam suprir o serviço público. Portanto, melhor para a sociedade brasileira seria que as concessões de aproveitamentos hidrelétricos revertissem à União, que as renovaria com a condição de operarem para suprir, em primeiro lugar, o serviço público.

O mesmo vale para outros eletrointensivos, tais como os ferrosligas e os produtos da linha soda-cloro, de modo que seria mais eficiente que se adotasse a estratégia de se restringir a produção de eletrointensivos à escala necessária para atender à demanda interna, com apenas uma pequena margem para exportações de interesse da política de comércio exterior do país, pois o Brasil não precisa se submeter aos interesses dos exportadores de produtos primários e semi-acabados com isenção fiscal, que são transformados, seja em quinquilharias, seja em produtos acabados de alto valor agregado, que são exportados para o Brasil ou aqui montados, mediante o pagamento de *royalties*, geralmente muito altos.

\* \* \*

No que toca a preservação ambiental, deve-se procurar reduzir ao mínimo as deseconomias causadas pelos impactos ambientais decorrentes da produção e uso de energia, planejando uma oferta racional de bens e serviços, em termos *per capita*, suficiente para

assegurar padrões adequados de qualidade de vida, sem agredir irreversivelmente os ecossistemas envolvidos.

É importante assinalar que a produção é uma função direta dos materiais (ou matérias primas), da energia e da informação (ou tecnologia), isto é:  $p = f(M, E, I)$ .

Portanto, para se aumentar a produção usando menos energia (e, eventualmente, menos matérias primas), deve-se elevar o nível de informação, ou seja, o conteúdo tecnológico dos bens e serviços produzidos.

Nos países industrializados esta interdependência tem ensejado aperfeiçoamentos na maioria das instalações industriais que consomem energia, para transformar um *input* de materiais, num *output* de produtos acabados.

O progresso tecnológico permitirá que os países em desenvolvimento sigam caminhos menos *energy intensive*, que os percorridos pelos países que hoje são industrializados. No entanto, investe-se atualmente (2.005) no Brasil apenas cerca de 1% do PIB em tecnologia (Carvalho *et all*, 2006). É necessário aumentar esse investimento. Para se obterem resultados em curto prazo, o esforço tecnológico deve se concentrar em áreas indicadas pela própria demanda criada pelo desenvolvimento. Note-se que desenvolvimento tecnológico não significa complexidade técnica, nem emprego obrigatório de equipamentos e *gadgets* de última geração. Por exemplo, a construção de casas de madeira (que é uma tecnologia milenar), pode se transformar numa prática extremamente moderna, desde que a madeira seja extraída de florestas industriais, de espécies melhoradas por engenharia genética, plantadas em zonas ecologicamente adequadas, sem provocar desmatamento de florestas nativas. E que a exploração das florestas industriais baseie-se em técnicas de programação, aplicadas mediante *softwares* especialmente desenvolvidos e, ainda, que as casas de madeira sejam moduladas, com suas peças fabricadas em série, para, após rigoroso controle de qualidade, serem expedidas e montadas no local da obra, que deverá estar previamente urbanizado. Este exemplo, propositalmente banal, mostra como a combinação estratégica de velhas e boas tecnologias tradicionais, com tecnologias sofisticadas, permite que se tenham, em larga escala (e sem agredir o meio ambiente, pelo uso perdulário de energia e materiais), serviços e produtos de que as pessoas realmente precisam, como as habitações populares, acessíveis a todos (Ver Apêndice C).

Um programa de desenvolvimento industrial-energético orientado segundo estes princípios seria fundamental para a transição de modelo insustentável, para um modelo sustentável.



Com uma gradativa substituição, onde viável, de metais ferrosos e não ferrosos, que são altamente *energy intensive*, por matérias primas tais como madeiras, bambus e fibras vegetais, tal redução poderia ser muito maior. Uma estimativa das margens dessa redução requer muito trabalho de pesquisa industrial e agrícola.

- **O setor de transportes**

Pela tabela 26 vê-se que em 2.006 os transportes responderam 27,4% do consumo final energético no país.

A tabela 28 mostra a subdivisão modal deste consumo.

Uma análise ainda que superficial desta tabela deixa claro o sistema de transportes do país pode ser reestruturado, visando à integração dos diversos modos e à otimização da eficiência global do sistema.

**Tabela 28** - Consumo de energia no setor de transportes

MODO	Consumo (10 <sup>6</sup> tep)
Rodoviário	49.067
Ferrovário	861
Hidroviário	1.088
Aéreo	2.435
Total	53.270

**Fonte:** EPE - BEN 2.007

As características da rede fluvial do Brasil permitiriam que se transportassem por hidrovias cerca de 30% da produção agrícola e mineral das regiões de origem para os pólos industriais, entrepostos e portos (D'Almeida, 1.992). Além disso, dadas as características favoráveis do relevo, outros 40% poderiam ser transportados por ferrovias, restando 30% para as rodovias.

Quanto ao transporte aeroviário, que é praticamente o único meio adequado para o transporte de passageiros num território extenso como o brasileiro, pode ser substituído pelo transporte ferroviário para percursos de pequena e média distância, como, por exemplo, entre o Rio e São Paulo e entre estas cidades e Belo Horizonte.

No interior das grandes conurbações da Região Centro Sul, que são as regiões mais densamente habitadas e industrializadas do país, o modo ferroviário (metrô e trens suburbanos) poderia desempenhar um papel mais relevante no transporte coletivo de passageiros. Como o modo ferroviário é menos energointensivo do que os demais, seu emprego resultará em diminuição do consumo global de energia. E como pode ser totalmente

eletrificado, o consumo de combustíveis fósseis seria reduzido na razão inversa da expansão das ferrovias eletrificadas.

Com a modulação da demanda de energia elétrica, mediante o ajuste das produções energointensivas à demanda interna (calculada em função das efetivas necessidades da sociedade local), a diminuição das esportações desses produtos resultaria num excedente de energia elétrica bastante para eletrificar cerca de 40% dos sistemas de transportes de cargas e praticamente todas as redes de transportes coletivos urbanos e interurbanos.

A tabela 29 apresenta as relações entre os consumos de energia nos diversos modos. (Os dados foram normalizados, para atribuir ao transporte ferroviário o índice 100).

Dessa tabela resulta evidente que uma integração, visando à eficiência energética da rede de transportes, proporcionaria uma importante redução do consumo final de energia do país. Esta economia seria principalmente de combustíveis derivados de petróleo, uma vez que, segundo a EPE, atualmente os transportes respondem por 51% do consumo desses combustíveis.

**Tabela 29** - Consumo específico de energia nos diversos modos de transporte.

Modo	Consumo específico
Ferrovário (R)	100
Hidroviário	145
Rodoviário	380
Aeroviário	2.900

**Fonte:** Centre d'information sur l'énergie durable, 1996 (Dados normalizados)

É importante assinalar que grande parte desse consumo refere-se ao transporte rodoviário de cargas, visando ao abastecimento das regiões metropolitanas com produtos agrícolas, leite e laticínios.

A solução do problema do transporte de alimentos provenientes de distâncias cada vez maiores foi uma das mais importantes características da era do petróleo.

A produção da agricultura e da pecuária em regiões afastadas dos pólos de consumo permitiu a concentração de grandes contingentes populacionais em áreas restritas, favorecendo a proliferação de megalópolis em todos os continentes.

Em alguns países europeus, particularmente a Itália, o público começa a tomar consciência das vantagens de se produzirem alimentos em regiões próximas dos centros consumidores, seja porque os produtos transportados de longe não têm a mesma qualidade daqueles que vêm de perto (Barghini, 2009), seja porque as grandes distâncias encarecem os preços.

O ordenamento do território visando à diminuição das distâncias de transporte de propiciaria economias de combustíveis nas mesmas proções (Ver Apêndice B).

- **Os setores residencial, comercial e os edifícios públicos**

Respondendo por 11,3% do consumo final, este setor é o terceiro da lista da tabela 26. A tabela 30 apresenta, em valores médios, uma subdivisão percentual do consumo de energia em residências e edifícios comerciais e edifícios públicos, para iluminação, condicionamento de ambiente, aquecimento de água sanitária (chuveiros e/ou *boilers*) e refrigeração (geladeiras).

O exame dessa tabela sugere que edifícios projetados para as condições climáticas das diversas regiões do país – que são suficientemente temperadas e amenas para dispensarem importantes cargas de refrigeração e muitas horas de iluminação artificial – seriam energeticamente bem mais econômicos do que os atuais (Roméro, M.A., 2001, p. 20 - 24).

**Tabela 30** – Consumo de energia em edifícios, por uso final (%)

<b>Edifício</b>	Iluminação	Condicionamento	Geladeira	Chuveiro/ <i>boiler</i>	Outros
Residencial	12	7	33	23	25
Comercial	50	34	~	~	16
Público	24	48	~	~	28

**Fonte:** Lamberts *et al*, 1997 (adaptação)

## 9.2 O lado da oferta

Já vimos que, em função das fontes primárias disponíveis e respectivas formas de exploração, projetos de mesmo objetivo podem receber diferentes graus entrópicos. Vimos também que o objetivo da estratégia de oferta não deve ser o de produzir mais energia, mas sim o de assegurar energia para que a produção de bens e serviços seja suficiente para o bem-estar da sociedade. Se, por exemplo, dobrarmos o consumo de energia *per capita*, não atingiremos, só por isso, um nível de qualidade de vida duas vezes superior ao atual. É necessário, também, que a energia seja consumida em projetos e em atividades que, de fato, contribuam para que se atinja o objetivo procurado. As fontes de energia empregadas em praticamente todas as atividades econômicas destinam-se basicamente à produção de energia elétrica e à geração de calor para a produção industrial e para os transportes (motores e turbinas de diversos tipos).

No capítulo 3 mostrou-se que em projetos de geração de energia elétrica, as usinas hidrelétricas e eólicas acarretam menores impactos ambientais (ou têm menor grau entrópico) do que termelétricas e, entre as termelétricas, aquelas a biomassa apresentam menor grau entrópico do que as alimentadas a combustíveis fósseis e assim por diante. Portanto, no que respeita à oferta de energia elétrica, para se atingir a sustentabilidade deve-se, na medida do possível, atribuir prioridade às fontes hidrelétricas, eólicas, fotovoltaicas, de resíduos urbanos industriais e agrícolas, etc.

Para a geração de calor de processo, os combustíveis de biomassa apresentam menor grau entrópico do que os combustíveis fósseis.

Nesta tese, a geração elétrica a combustíveis não renováveis (fósseis) será tratada apenas de passagem, na medida em que ainda será necessária, durante a transição da matriz atual, para a matriz sustentável.

A seguir está indicado o potencial das diversas fontes renováveis de energia primária, disponíveis no Brasil.

### 9.2.1 Energia elétrica

**Potencial hidrelétrico** - O território brasileiro abrange oito grandes bacias hidrográficas, que são as bacias dos rios Amazonas; Tocantins e Araguaia; a bacia dos rios que deságuam nas regiões Norte e Nordeste; a bacia do São Francisco; a bacia dos rios que deságuam na região Leste, a bacia dos rios Paraná e Paraguai; bacia do Rio Uruguai e a bacia dos rios que

deságuam nas regiões Sul e Sudeste. A figura 8 mostra a situação geográfica dessas bacias hidrográficas.

**Figura 8 Bacias hidrográficas brasileiras**



Fonte: ANEEL

- A **Bacia do Rio Amazonas** é maior rede hidrográfica mundial, formada por 25.000 km de rios navegáveis e abrangendo uma área de drenagem da ordem de  $6,9 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, dos quais  $3,6 \times 10^6$  km<sup>2</sup> estão no Brasil (cerca de 42% do território do país) e se estendendo dos Andes até o Oceano Atlântico. Seu principal rio é o Amazonas, com extensão de 6.570 km. Este rio nasce em território peruano, no riacho Lauricocha, originário da lagoa do Ninõ, nas geleiras da cordilheira de Santa Anna, cerca de 5.000m acima do nível do mar. O percurso inicial, da ordem de 45 Km, é em quedas, no sentido norte, formando as lagoas Santa Anna, Cablocacha, Nieveurco, Tinquincocha, Yanacocha e Patarcocha. Depois de desaguar no Lago Lauricocha, toma a denominação de Marañon, ainda no Andes, onde recebe pequenas contribuições e, depois de atravessar o Pongo de Manseriché, segue na direção leste, até sua foz, no Atlântico. Entra no Brasil na confluência com o rio Javari, somente a partir da confluência com o rio Javari, próximo a Tabatinga, sendo, então, chamado de Solimões e, somente a partir da confluência com o rio Negro, passa a ser denominado de Amazonas. Próximo a Manaus, bifurca-se com o Paraná do Careiro, estimando-se aí uma largura da ordem de 1.500m e

profundidade em torno de 35 m. Entre a confluência do rio Negro e a região das ilhas, próximo a desembocadura, é conhecido por Baixo Amazonas.

Em virtude de sua posição geográfica praticamente paralela ao Equador, o regime do Amazonas é influenciado pelos dois máximos de pluviosidade dos equinócios, sendo, por isso conhecido como regime fluvial de duas cheias.

A bacia Amazônica está sujeita ao regime de interferência, tendo contribuintes dos hemisférios Norte e Sul, coincidindo a cheia de um hemisfério com a vazante do outro.

- **A Bacia do Tocantins-Araguaia** se localiza quase inteiramente entre os paralelos 2° e 18° e os meridianos de longitude oeste 46° e 56°. Sua configuração alongada no sentido longitudinal, segue as diretrizes dos dois eixos fluviais – o Tocantins e o Araguaia – que se unem no extremo setentrional da Bacia, formando o baixo Tocantins, que desemboca no Rio Pará, pertencente ao estuário do rio Amazonas

A vazão média anual da bacia do Tocantins é de 10.900m<sup>3</sup>/s, volume médio anual de 344 Km<sup>3</sup> e uma área de drenagem de 767.000 km<sup>2</sup>, que representa 7,5% do território nacional. A área da bacia distribue-se pelos estados de Tocantins e Goiás (58%), Mato Grosso (24%); Pará (13%) e Maranhão (4%), além do Distrito Federal (1%). Limita-se com bacias de alguns dos maiores rios do Brasil, ou seja, ao Sul com a do Paraná, a Oeste, com a do Xingu e a leste, com a do São Francisco. Grande parte de sua área está na região Centro Oeste, desde as nascentes dos rios Araguaia e Tocantins até sua confluência, na divisa dos estados de Goiás, Maranhão e Pará. Desse ponto para jusante a bacia hidrográfica entra na região Norte e se restringe a apenas um corredor formado pelas áreas marginais do rio Tocantins.

- **A Bacia do Atlântico – trechos Norte/Nordeste** banha extensas áreas dos Estados do Amapá, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, e parte dos Estado da Paraíba, Pernambuco, Pará e Alagoas. Está compreendida entre as latitudes 4°13'N a 10°80'S e longitudes 34° 83'a 53° 33'W e sua vazão média anual é de 6.800 m<sup>3</sup>/s, a área de drenagem é de 996.000 Km<sup>2</sup> composta pelos trechos Norte e Nordeste. O Trecho Norte corresponde a área de drenagem dos rios que deságuam ao norte da Bacia Amazônica, incluindo a bacia do Oiapoque. A drenagem da bacia compõe-se de rios principais, que permanecem durante o ano com razoável vazão, se comparados aos da região semi-árida nordestina. O segundo trecho - Nordeste corresponde à área de drenagem dos rios que deságuam no Atlântico, entre a foz do rio Tocantins e a do rio São Francisco.

- **A *Bacia do São Francisco*** está compreendida entre as latitudes 7° 00' e 21° 00' S e longitudes 35° 00' e 47° 40' W, abrangendo parte dos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e Alagoas. Sua vazão média anual é de 3.360 m<sup>3</sup>/s, e o volume médio anual é de 10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>. Sua área de drenagem é de 631.000 km<sup>2</sup> (7,5% do território nacional). Com nascentes na Serra da Canastra, em Minas Gerais e uma extensão de 2.700 km, o rio São Francisco é o mais importante da bacia. Ele atravessa a longa depressão encravada entre o Planalto Atlântico e as Chapadas do Brasil Central, segue a orientação sul-norte até aproximadamente a cidade de Barra, dirigindo-se então para Nordeste até atingir a cidade de Cabrobó, quando inflete para Sudeste para desembocar no Oceano Atlântico.

- **A *Bacia da Região do Atlântico Sul – trecho Leste*** está localizada entre as latitudes 10° e 23° S e longitudes 37° e 46° W. Abrange parte dos estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Sergipe e os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Compreende a área de drenagem dos rios que deságuam no Atlântico, entre a foz do rio São Francisco, ao norte, e a divisa entre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, ao sul. Possui uma vazão média anual de 3.690m<sup>3</sup>/s, volume médio anual de 117 km<sup>3</sup> em uma área de drenagem calculada em 569.000 km<sup>2</sup>.

- **A *Bacia do Rio Paraná*** está quase toda entre os paralelos 14° e 27° e os meridianos de longitude oeste 43° e 60°. Sua vazão média anual é de 15.620 m<sup>3</sup>/s, o volume médio anual é de 495 km<sup>3</sup> e área de drenagem é de 1.237.000 km<sup>2</sup>, formada por 8 sub-bacias. Sua área de captação o Mato Grosso, Paraná, São Paulo e partes de Minas Gerais e Goiás. Limita-se com as bacias Amazônica e do Tocantins-Araguaia, ao norte; do São Francisco, a nordeste; do Atlântico - Trecho Leste, a sudeste e com a do Uruguai, ao Sul.

- **A *Bacia do Rio Uruguai*** abrange uma área de aproximadamente 384.000 km<sup>2</sup>, dos quais 176.000 km<sup>2</sup> estão em território brasileiro, compreendendo 46.000Km<sup>2</sup> do Estado de Santa Catarina e 130.000Km<sup>2</sup> do rio Grande do Sul. Sua vazão média anual é de 3.600m<sup>3</sup>/s, e o volume médio anual é de 114 km<sup>3</sup>. Estende-se entre os Paralelos de 27° e 32° latitude Sul e os meridianos de 49° 30' e 58° 15' WGr. É delimitada ao norte e nordeste pela Serra Geral, ao sul pela fronteira com a República Oriental do Uruguai, a leste pela Depressão Central Riograndense e a oeste pela fronteira com a Argentina.

Para efeito de estudos, a bacia do Uruguai foi dividida em 16 sub-bacias: Canoas, Pelotas, Forquilha, Ligeiro, Peixe, Irani, Passo Fundo, Chapecó, da Várzea, Antas, Guarita, Itajaí, Piratini, Ibicuí, alto Uruguai e Médio Uruguai.

- **A Bacia da Região do Atlântico Sul – Trecho Sudeste** tem (na porção situada em território nacional), uma área de drenagem de 224.000 km<sup>2</sup>. Banha extensas áreas do Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina, Paraná e São Paulo. Está compreendida entre as longitudes 44° W a 54° W e latitude de 22° S a 34° S. Dela fazem parte os rios Ribeira do Iguape, Itajaí, Mampituba, Jacuí, Taquari, Jaguarão (e seus respectivos afluentes), lagoa dos Patos e Lagoa Mirim.

A renovabilidade do potencial hidrelétrico depende da vazão dos rios, que depende das chuvas que alimentam as bacias hidrográficas que, por sua vez, dependem do clima próprio de cada ecossistema. As bacias hidrográficas da América do Sul, sobretudo as brasileiras, são direta ou indiretamente influenciadas pelo clima do ecossistema amazônico (Cowling, 2.004).

A umidade da região Centro-Sul e as chuvas da Bacia do Prata vêm da Amazônia. A evaporação da floresta gera um ciclo de nuvens e de chuvas que, ao encontrarem a Cordilheira dos Andes, descem para o Sul; se a floresta for derrubada, as chuvas escassearão e é possível que, com a derrubada de 25% da floresta, a Amazônia não possa mais gerar aquele ciclo, o que, além de comprometer a agricultura, desfalaria os mananciais de água para o consumo humano e o potencial hidrelétrico do país inteiro (Artaxo, 2007).

Até 2.007, apenas 27,3% do potencial hidrelétrico estavam em aproveitamento, como mostra a tabela 31. O sistema hidrelétrico brasileiro opera atualmente com um fator de capacidade de 55%. Este fator poderá ser aumentado com a entrada de novas hidrelétricas na Região Amazônica, a montante das que já estão operando, desde que os despachos de carga sejam racionalmente escalonados em função dos três fusos horários que abrangem o território brasileiro e dos regimes hidrológicos das bacias hidrográficas do norte e do sul do país.

**Tabela 31 - Potencial hidrelétrico brasileiro e seu aproveitamento até 2.007**

<b>Potencial hidrelétrico e seu aproveitamento</b>	<b>GW</b>	<b>%</b>
Usinas em operação (potencial já aproveitado)	71,2	27,3
Usinas previstas nos planos de expansão, até 2.025	98,6	37,7
Usinas previstas em planos posteriores a 2.025	73,7	28,3
<b>Sub total</b>	<b>243,5</b>	<b>93,3</b>
Potencial de Pequenas Centrais Hidrelétricas	17,5	6,7
<b>Total</b>	<b>261,0</b>	<b>100,0</b>

Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisas Energéticas – EPE

Pela tabela 32 vê-se que a maior parte do potencial ainda não explorado está na Amazônia, região onde atuam grupos ambientalistas radicalmente contrários à construção de



hidrelétricas. Velada ou abertamente, esses grupos contam com o apoio de empresas interessadas na construção de termelétricas a combustíveis fósseis e nucleares.

**Tabela 32** Distribuição geográfica do potencial a aproveitar

Região	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
%	65	3	3	8	21

Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisas Energéticas – EPE

No entanto, qualquer país que disponha de potencial hidrelétrico e capacidade técnica para explorá-lo, procura aproveitá-lo ao máximo, antes de apelar para alternativas mais caras e poluentes. Na Europa, por exemplo, as hidrelétricas respondem por 17% do suprimento de eletricidade, indo de 99% na Noruega, 76% na Suíça, 65% na Áustria, 51% na Suécia, 12% na França, etc. (Hydro Power and Dams World Atlas, 2001).

Nenhum outro país das dimensões econômicas e demográficas do Brasil goza de vantagem tão importante. A França, por exemplo, não tem alternativa para produzir a energia elétrica indispensável para a sobrevivência de sua economia (que é intensamente eletrificada), a não ser a energia nuclear. Aquele país tem 59 centrais nucleares operadas pela estatal Electricité de France (EdF), que geram mais de 430.109 kWh por ano, perfazendo cerca de 78% da eletricidade consumida no país. A idade média das centrais nucleares francesas está em aproximadamente 27 anos, portanto grandes investimentos deverão ser feitos nos próximos anos, para desativar velhas centrais e construir novas. Em 2005 o governo francês adotou uma nova legislação de política energética e segurança de instalações nucleares – e decidiu investir no desenvolvimento de um reator de nova geração, o European Pressurised Water Reactor (EPR), com a construção de uma unidade inicial de 1.650 MW prevista para 2015.

Graças ao potencial hidrelétrico, o Brasil não precisa arcar com ônus semelhante.

**Potencial eólico** – O desenvolvimento da energia eólica no Brasil ainda se encontra em estágio inicial, mas, de acordo com levantamentos realizados pelo CRESESB, do CEPEL/Eletróbrás, com a participação de consultores das empresas Camargo Schubert Energia Eólica e *True Wind Solutions*, o potencial eólico brasileiro é da ordem de 140.000 MW. A tabela 33 resume os resultados desses levantamentos.

No Brasil, o regime dos ventos apresenta complementaridade sazonal com o regime pluviométrico, de forma que os parques eólicos poderiam alcançar fatores de capacidade de 30%, desde que se estruturasse um sistema hidro-eólico-térmico, que seria a forma ideal para

a otimização do sistema elétrico brasileiro. Fatores de capacidade dessa ordem são superiores aos de sistemas que não possam aproveitar sinergias semelhantes.

**Tabela 33** - Potencial eólico, para ventos com velocidade média superior a 7 m/s

REGIÃO	Área cumulativa (km <sup>2</sup> )	Potência instalável (GW)
Norte	6.420	12,84
Nordeste	37.526	75,05
Centro-Oeste	1.541	3,08
Sudeste	14.869	29,74
Sul	11.379	22,76
BRASIL	71.735	143,47 *

**Observações:** 1– Foram considerados parques eólicos com densidade máxima de ocupação do solo de 2 MW/km<sup>2</sup>, que é conservadora. 2 – Não foram consideradas áreas ocupadas por florestas, lagos e rios, nem áreas sobre o mar. 3 – Admitiram-se curvas médias de desempenho de modernas turbinas eólicas encontradas no mercado, instaladas em torres de 50 m de altura.

**Fonte:** Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – CRESESB/CEPEL/Eletróbrás, 2.001

Com o desenvolvimento tecnológico que resultará do aprendizado na aplicação, os ganhos de escala permitirão que a energia eólica alcance custos inferiores às alternativas termelétricas convencionais – e muito inferiores à alternativa eletronuclear, como se mostra no anexo III.

**Potencial fotovoltaico** - O potencial fotovoltaico pode ser aproveitado com vantagem em instalações isoladas, de geração distribuída.

Para estimular o aproveitamento da energia fotovoltaica, países desenvolvidos, como o Japão a França e a Alemanha têm implantado programas de incentivo para baixar o custo da energia gerada nessas instalações a níveis competitivos com as fontes tradicionais. Graças a essa política, só na Alemanha, por exemplo, foram instaladas cerca de 130 mil instalações fotovoltaicas, em 2.007, somando uma potência 1.200 MW (Rüther, Zilles, 2.008). Aquele país já conta um total de 430 mil sistemas fotovoltaicos, totalizando uma potência de 3.800 MW, equivalente, portanto a três centrais nucleares do porte de Angra II.

Segundo o professor Ricardo Rüther, que é pesquisador do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina, “o lugar menos ensolarado do Brasil (Florianópolis) recebe 40% mais energia solar do que o lugar mais ensolarado da Alemanha”.

No Brasil, o uso da energia solar se restringe, praticamente, a aquecedores termosolares, usados principalmente em aquecimento de água para banho, ficando os sistemas fotovoltaicos limitados a uns poucos projetos de escala essencialmente experimental.

O professor Rüther calcula que, “se a área do lago de Itaipu fosse coberta com painéis solares, isso duplicaria a capacidade do sítio, ou seja, com o acréscimo fotovoltaico, Itaipu

produziria o dobro da energia que produz só com o aproveitamento hidrelétrico e, em vez de fornecer os atuais 25%, a usina passaria a cobrir 50% da eletricidade consumida no Brasil (Rüther, 2.009). Para isso, seriam necessários investimentos importantes, de longo prazo de retorno, em programas de P&D, treinamento de pessoal e implantação de projetos em escala piloto, de modo que tudo dependerá de vontade política dos governantes, espírito inovador dos empresários e apoio da população.

Para o médio prazo, com base em estudos do CRESEB/CEPEL/Eletróbrás, o MME estima que, até 2.015, o potencial fotovoltaico poderia cobrir a demanda de 1,7 milhões de pessoas, atendendo a cerca de 430.000 domicílios rurais, que não têm acesso à rede elétrica.

**Potencial de resíduos urbanos, industriais e agrícolas** - Dependendo da região, intensidade industrial, densidade demográfica e grau de urbanização, diversas formas de resíduos e rejeito podem desempenhar um papel importante no contexto de um cenário sustentável.

Algumas dessas fontes apresentam-se na forma de resíduos e sobras da exploração agrícola, rejeitos industriais e lixo urbano.

As sobras agrícolas podem ser usadas, por exemplo, como combustível para fornos de secagem de grãos ou de madeira.

Determinados resíduos podem ser submetidos à digestão anaeróbica, para a produção de biogás.

Os rejeitos industriais são importantes para o setor energético, principalmente por poderem ser reciclados e reaproveitados como matéria prima, proporcionando economias indiretas de energia e redução de impactos ambientais.

O lixo urbano tem um considerável potencial energético e – desde que feito coordenadamente com os órgãos de meio ambiente e saúde pública – seu aproveitamento pode trazer importantes benefícios sociais e ambientais.

Para ficarmos especificamente no setor elétrico, até 2.030, o lixo urbano poderá fornecer combustível para termelétricas totalizando 11.420 MW de potência instalada, sendo 1.700 MW a biogás de aterros; 3.740 MW a resíduos incineráveis e 5.980 MW como combustível para ciclos combinados otimizados (EPE, Plano 2.030).

Essas termelétricas poderiam operar com um fator de capacidade médio da ordem de 50%, desde que estrategicamente interligadas ao sistema (Schäffer, 2.009).

A interligação do sistema hidrelétrico com o sistema eólico permitiria que a energia gerada por pelas centrais eólicas fosse armazenada - ou acumulada na forma de água - nos reservatórios hidrelétricos, de maneira semelhante às malhas termo-eólicas que estão sendo

estudadas em alguns países europeus, nas quais a energia das eólicas é armazenada na forma de óleo combustível economizado (Ummels *et al*, 2.008).

### **Resumo – O potencial elétrico sustentável**

No Brasil, um sistema hidro-eólico poderia operar em sinergia com usinas termelétricas a biomassa, pois a colheita da cana de açúcar ocorre durante as estações secas, e a frota automotiva brasileira é em grande parte alimentada com etanol, forçando a produção de bagaço de cana em escala suficiente para alimentar termelétricas de pequeno e médio porte, totalizando, em conjunto, uma capacidade da ordem de 10.000MW por volta de 2.012 (UNICA, 2008).

Como o esmagamento e demais etapas do processamento da cana para a produção de etanol ocorre ao longo de 8 meses por ano, o fator de capacidade do conjunto das termelétricas a bagaço pode chegar a 60%.

O sistema integrado hidro-termo-eólico teria, portanto, um potencial de oferta da ordem de  $1,35 \times 10^9$  MWh/ano. Somando-se o potencial dos resíduos urbanos, industriais e agrícolas, a oferta total de energia elétrica poderia chegar a  $1,4 \times 10^9$  MWh/ano.

Neste total não incluímos o potencial fotovoltaico, que, entretanto, pode desempenhar um papel importante em sistemas isolados. Mesmo assim, apenas com o uso de fontes renováveis, seria atingido o consumo de eletricidade *per capita* dos países de alto nível de qualidade de vida.

### **9.2.2 Combustíveis**

Um dos principais obstáculos para a para transição do modelo insustentável para um modelo sustentável está no setor de transportes, no qual os combustíveis de alta densidade energética, como a gasolina, o querosene e o diesel, são indispensáveis.

Na transição para o modelo sustentável, a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética deve decrescer, enquanto cresce a dos combustíveis de biomassa, com menor grau entrópico, como foi visto no capítulo 3.

### **Combustíveis renováveis**

Para se estimar o potencial de produção de combustíveis de renováveis obtidos a partir de biomassas, temos que conhecer a extensão de terras que podem ser destinadas às plantações energéticas, observando as restrições de não entrar em áreas de preservação ambiental, nem ocupar terras vitais para a produção de alimentos.

A tabela 34 apresenta a subdivisão do território brasileiro em função de seus usos atuais, com as respectivas áreas, observando as restrições acima colocadas.

**Tabela 34 – Ocupação do território brasileiro, em 2.005**

<b>Área</b>	<b>10<sup>6</sup> ha</b>
Ecosistema amazônico	350
Pastagens	215
Áreas de proteção	55
Culturas anuais	47
Culturas permanentes	15
Rios e lagos	15
Áreas urbanizadas + infra-estrutura	5
Florestas industriais	6
Outros usos	53
Cultiváveis, livres	90
<b>BRASIL</b>	<b>851</b>

Fonte: IBGE/2005

Com base no princípio da precaução, não consideraremos a Região Amazônica como aproveitável para as plantações de energia, pois, como foi dito no item 9.2.1, a vazão dos rios, o potencial hidrelétrico, a sustentabilidade da agricultura e os mananciais de água potável do país dependem da integridade dos ecossistemas daquela região. Pode-se, entretanto, aproveitar localmente o potencial energético dos óleos vegetais da região, explorados em regime extrativista.

\* \* \*

Segundo o Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, se a pecuária passar ao regime confinado, cerca de 70% das atuais áreas de pastagens poderiam ser convertidas para a agricultura de produção de alimento (soja, milho, etc.) e para “plantações de energia”, inclusive cana de açúcar. Por conseguinte o Brasil pode expandir a sua fronteira agrícola em 197 milhões de hectares, sem avançar na floresta Amazônica.

Apresenta-se a seguir uma estimativa do potencial brasileiro de produção de etanol e biocombustíveis lignocelulósicos.

De concreto temos, por enquanto, o etanol. Prevê-se que, em 2.030, cerca de  $14 \times 10^6$  ha serão ocupados por plantações de cana de açúcar, para produzir  $67 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de etanol, equivalentes a  $6 \times 10^6$  tep, o que seria suficiente para cobrir apenas cerca de 18% da demanda por gasolina, prevista pela EPE para aquele ano. Se acrescentarmos a isto o biodiesel que se espera produzir anualmente até 2.030, o Brasil poderia substituir, ainda, cerca de 11% do diesel que, segundo o Plano 2.030, seria consumido naquele ano.

Vê-se, pois que a produção de combustíveis de biomassa prevista nos planos

do governo está muito abaixo do que seria necessário, para substituir os combustíveis derivados de petróleo, na matriz energética brasileira.

Há, entretanto, a possibilidade de se alcançar a produção requerida para substituir por combustíveis renováveis, o diesel, o querosene de aviação, o GLP, o óleo combustível e a parte da gasolina não coberta pelo etanol, desde que se viabilizem os processos que atualmente estão em fase de estudos de viabilidade técnica e econômica, para converter biomassas linocelulósicas, provenientes de rejeitos da agricultura e da indústria florestal-madeireira, em hidrocarbonetos densos em energia, semelhantes aos mencionados.

Como foi dito no item 5.2.3, estão em desenvolvimento, nos Estados Unidos, tecnologias baseadas no emprego de catalisadores, para transformar os açúcares presentes nos vegetais em hidrocarbonetos como a gasolina, o diesel e o querosene, que são mais densos em energia do que o etanol e, portanto, abrem a perspectiva de que grande parte do sistema de transportes venha a ser alimentado com combustíveis renováveis. As considerações que fazemos a seguir têm caráter apenas informativo, pois seria temerário supor que se possa passar a um modelo sustentável, com base em tecnologias que estão em fase de desenvolvimento.

Mas o fato é que os americanos esperam que a nova geração de biocombustíveis esteja pronta para licenciamento em 2011 e, embora ainda seja necessário fazer grandes investimentos em pesquisa e *engineering*, a confiança por eles depositada nos resultados desses investimentos chega a ponto de planejarem suprir, com esses combustíveis, cerca de 20% da demanda do setor de transportes, que seria suprida com combustíveis derivados de petróleo no ano de 2.020 (US Dept. of Energy and US Dept. of Agriculture, 2005). Esses 20% equivalem a, aproximadamente,  $9,5 \times 10^7$  tep/ano, ou seja, mais de duas vezes a demanda brasileira de petróleo, prevista pela EPE para o ano 2.030, que seria de  $4,5 \times 10^7$  tep/ano (EPE, Plano 2.030).

O processo de produção desses combustíveis tem a vantagem empregar catalisadoras resistentes a altas temperaturas, que destruiriam as enzimas usadas na fermentação do mosto da cana. As reações catalíticas são mais velozes e, no processo, as moléculas da biomassa, ricas em carbono, separam-se em diferentes componentes, que se recombinaem para formar compostos químicos que são normalmente obtidos do processamento do petróleo. Além disso, a produção desses hidrocarbonetos é mais eficiente do que a produção de etanol, porque este exige uma destilação que requer grandes quantidades de energia, enquanto os referidos hidrocarbonetos se separam automaticamente da água (Regalbutto, 2009).

A tabela 35 apresenta uma síntese das possibilidades de aproveitamento, nos Estados Unidos, dos resíduos da agricultura de produção de alimentos e da indústria florestal-madeireira.

**Tabela 35** – Resíduos da agricultura e da indústria florestal, nos Estados Unidos.

Resíduos	Agricultura	Florestas industriais
No campo (resíduo/produto)	2:1	0,3:1
Parte removível	16%	25%

**Fonte:** Oak Ridge National Laboratory, 2005

Em fase de pesquisa aplicada (inclusive com instalações piloto e semi-indústrias que comprovam a viabilidade dos processos) estão diversas vias para a conversão de biomassas lignocelulósicas em hidrocarbonetos de fórmula geral que pode ir de  $C_2H_6$  até  $C_{18}H_{38}$  (que podem substituir desde o GLP até o óleo combustível) passando por líquidos leves, que estão sendo chamados de querosene, gasolina e diesel “verdes”.

**Tabela 36** – Processamento de biomassa lignocelulósica

Produto	Fração
Biocombustíveis	45%
Gás (90% $CO_2$ )	25%
Água + matéria orgânica solúvel	30%

**Fonte:** University of Massachusetts, 2007

No Brasil, ainda não se começou a investir sistematicamente no desenvolvimento de tecnologias de produção de combustíveis lignocelulósicos, apesar de o país ter um clima favorável e extensão das terras livres para expandir a produção, e dispor de excelentes instituições de pesquisa agrícola, além de poder contar com produtores rurais capazes de por em prática as inovações tecnológicas necessárias para integrar as produções agropecuária e agroenergética.

Isto nos leva a tomar por base os números já publicados pelos americanos, para estimar, embora muito aproximadamente, o potencial brasileiro de produção de combustíveis lignocelulósicos.

Em primeiro lugar, se as tecnologias acima referidas se tornarem viáveis, teríamos que aproveitar ao máximo o potencial de geração de rejeitos da agricultura e da indústria florestal brasileira, para produzir os combustíveis na escala necessária para substituir os derivados de petróleo. Pela tabela 34 vê-se que o Brasil dispõe de  $90 \times 10^6$  ha livres, para expandir a fronteira agrícola. Acrescentando-se a isto a área que pode ser liberada graças à racionalização da pecuária (que passaria de extensiva, a semiconfinada), a fronteira agrícola se estenderia para  $197 \times 10^6$  ha, sem avançar na floresta Amazônica nem em áreas de preservação ambiental.

Admitindo-se que, até 2.030, a área de culturas anuais cresça dos atuais  $47 \times 10^6$  ha, para  $60 \times 10^6$  ha; a área de culturas permanentes passe de 15 para  $20 \times 10^6$  ha, e a área de florestas industriais passe de 6 para  $10 \times 10^6$  ha, teríamos uma ocupação produtiva de  $90 \times 10^6$  ha.

Ainda assim restariam  $107 \times 10^6$  ha. Contudo, tomando-se em conta o Princípio da Precaução e tendo em vista o fato que as camadas superficiais dos solos são destruídas pela superexploração e pelo emprego de fertilizantes de origem petroquímica, em vez de cobrir essas áreas com novas plantações de energia, dever-se-ia distribuí-las em parcelas pelas plantações já expandidas até os  $60 \times 10^6$  ha acima referidos, que passariam a ser explorados em sistema de rodízio (de certa forma baseados no Método Voisin), com rotações programadas em ciclos que permitiriam a recomposição da camada fértil dos solos, sob pena de que as altas produtividades atualmente conseguidas se sustentem por apenas algumas décadas. Voltaremos a este tema no Apêndice B - “Ordenamento do território visando à sustentabilidade”.

Tratando a questão de forma agregada, pode-se estimar em  $180 \times 10^6$  toneladas/ano a produção das culturas anuais, número que, de resto, foi confirmado pelo coordenador de planejamento estratégico do Ministério da Agricultura, em palestra feita no 47º Congresso Anual da Sociedade Brasileira de Economia Administração e Sociologia Rural, realizado em Porto Alegre (Gasques, 2.008).

Por outro lado, a produção florestal cresceria das atuais  $15 \times 10^6$  toneladas de madeira em toras (Abraf, 2.009), para algo em torno de  $60 \times 10^6$  toneladas/ano, o que significa que a massa de árvores costadas será da ordem de  $120 \times 10^6$  toneladas/ano (Ver Apêndice C).

Com a ressalva de que os índices da tabela 29 valem para os Estados Unidos, se os aplicarmos à produção brasileira, veremos que as  $180 \times 10^6$  toneladas/ano acima estimadas deixariam no campo  $360 \times 10^6$  toneladas de rejeitos por ano, e a produção de  $120 \times 10^6$  toneladas de árvores deixaria 40 toneladas de rejeitos, por ano.

A tabela 36 mostra que seria possível converter 45% dessa massa total de rejeitos (ou seja,  $160 \times 10^6$  toneladas/ano) em biocombustíveis linocelulósicos, adequados para substituir derivados de petróleo tais como GLP, querosene, gasolina, diesel e óleos pesados.

Abre-se, assim a possibilidade de se produzir o equivalente a  $160 \times 10^6$  tep/ano de biocombustíveis linocelulósicos, o que seria suficiente para atingir um consumo *per capita* próximo ao dos países listados na tabela 24. Evidentemente, se as tecnologias em causa não se viabilizarem, teremos que modificar rapidamente os atuais padrões de consumo, para evitar os traumas que certamente adviriam de uma transição brusca para a era *pós-petróleo*.



### Combustíveis não renováveis

Como foi dito anteriormente, o petróleo e o gás natural são tratados apenas de passagem nesta tese, pelo papel que ainda têm a desempenhar, durante a transição do modelo atual, para o modelo sustentável.

A tabela 37 apresenta as reservas brasileiras desses combustíveis. Optamos por desconsiderar o carvão mineral, porque, além de poder desde já, ser excluído da matriz energética brasileira, entendo ser incoerente continuar a usá-lo, quando o nosso objetivo é “limpar” a matriz energética e atingir a sustentabilidade.

**Tabela 37** - Reservas brasileiras de petróleo e gás, conhecidas e estimadas, até 2006

Combustível	Medidas	Adicionais (não descobertas)
Petróleo	$2,385 \times 10^9 \text{m}^3$	$6,709 \times 10^9 \text{m}^3$
Gás natural	$326 \times 10^9 \text{m}^3$	$4.891 \times 10^9 \text{m}^3$

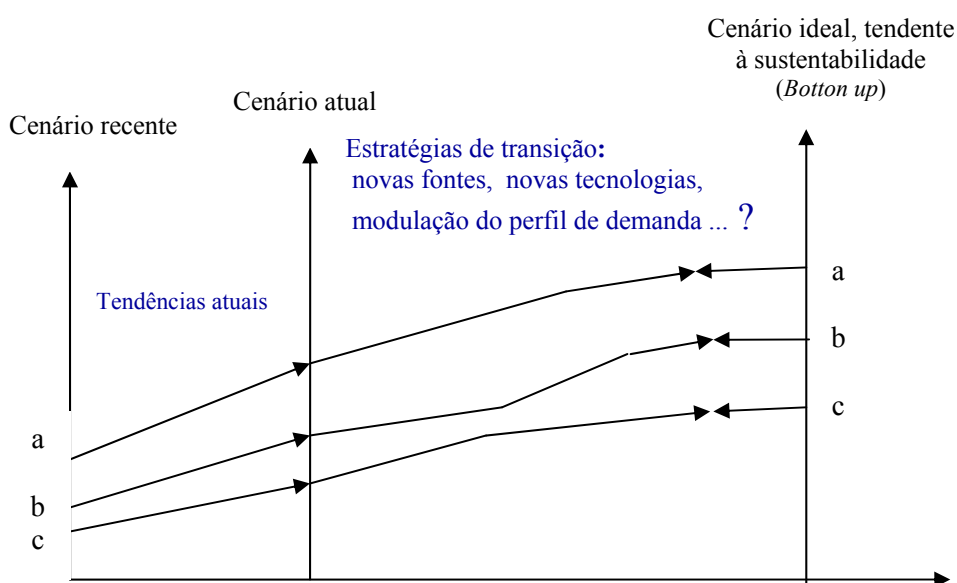
Fonte: EPE/MME – Plano 2.030

No Apêndice A são apresentadas estimativas da possível duração das reservas brasileiras de petróleo e gás natural, tomando por base as reservas já comprovadas e medidas, somadas às “reservas adicionais não descobertas”, que estão essencialmente na província petrolífera do Pré-sal. Mostra-se ali que o Brasil dispõe, respectivamente, de no máximo 3 décadas para se adaptar à escassez de combustíveis líquidos derivados de petróleo e 6 décadas, para encontrar uma alternativa ao gás natural.

No apêndice B é analisada a questão do ordenamento do território, com vistas à racionalização do consumo de combustíveis, e nos apêndices C e D são apresentados casos em que é possível substituir energia e matérias primas de origem petrolífera, por sucedâneos de origem fotossintética.

### 9.3 Um cenário ideal, em 2.030

Um cenário tendente à sustentabilidade (cenário ideal) deve ser caracterizado por um decréscimo da participação dos combustíveis fósseis na matriz energética, acompanhado de um correspondente aumento da participação das fontes renováveis. Isto implicaria uma importante modificação dos modelos de ocupação do território e de urbanização. Implicaria também, entre outras coisas, a substituição de matérias primas de origem petroquímica, por outras de origem fotossintética.



**Figura 9** – Construção do cenário ideal

No item 9.1 e nos Apêndices C e D são apresentados casos em que essa substituição é técnica e economicamente viável, com o uso de tecnologias que existem e já foram empregadas no Brasil. No caso dos derivados acéticos, a indústria alcoolquímica foi abandonada em meados dos anos 1.950, quando a nafta passou a competir vantajosamente com o etanol, no mercado brasileiro. No caso da madeira, nos estados do Sul este material era muito usado até meados do século XX, na construção de habitações, mas acabou sendo suplantado pela alvenaria.

Considerando que o setor de transportes responde pela maior parte do consumo de combustíveis derivados de petróleo, é evidente que o caminho mais direto para diminuição da demanda por esses combustíveis passa pela reformulação dos modelos de ocupação do território e de urbanização, paralelamente à reestruturação de toda a infra-estrutura de transportes de carga e de passageiros.

Para o transporte coletivo urbano seria possível substituir boa parte do diesel, por energia elétrica. Este assunto é abordado no Apêndice B.

Se tais reformulações fossem sendo gradativamente introduzidas, em 2.030 o perfil de consumo de energia poderia tomar a forma indicada na tabela 38.

**Tabela 38** – Possível perfil do consumo de energia por fonte, em 2.030

<b>Fontes</b>	<b>%</b>
<b>Não renováveis</b>	<b>33,0</b>
Petróleo e derivados	27,0
Gás natural	4,0
Carvão mineral	0,0
Urânio	2,0
<b>Renováveis</b>	<b>67,0</b>
Energia hidráulica	31,0
Lenha e carvão vegetal	8,0
Produtos de cana de açúcar	15,0
Biodiesel	2,0
Outras (inclusive eólica)	10,0

A tabela 39, a seguir, apresenta projeções do IBGE referentes à demografia e do Banco Central, à economia, em 2.030.

**Tabela 39** – Cenário em 2.030 – Informações complementares

População: ~ 220 milhões de habitantes (Projeção do IBGE); Taxa de urbanização: ~ 80%; População economicamente ativa (PEA): ~ 106 milhões; Desempregados: ~ 5 milhões (Estimativa do cenário sustentável); Subempregados: ~ 8 milhões (Estimativa do cenário sustentável); PIB em 2.005: US\$ 797 bilhões, a preços correntes (BACEN, Relatório 2005); Taxa de crescimento do PIB entre 2.005 e 2.030 = 4,1 % ao ano; PIB *per capita*: cerca de US\$ 6.620. **Fontes:** IBGE; BACEN e elaboração própria.

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

A transição do modelo insustentável para um sustentável deverá resultar de ações empreendidas pela sociedade como um todo, o que engloba a administração pública, o empresariado, as universidades, os meios de comunicação e o público em geral. O modelo sustentável somente poderá ser implantado mediante ajustes gradativos nas políticas de investimentos públicos e privados na infra-estrutura energética e nos setores industrial, agrícola, comercial e de serviços, porque o setor energético é parte integrante do complexo político-econômico-social, portanto sua configuração e os rumos de sua evolução dependem de fatores técnicos diretamente relacionados à energia – e também de pressões políticas, sociais e econômico-financeiras. Daí a necessidade de que a estratégia de investimentos no setor energético seja planejada não apenas com base em fatores diretamente ligados à produção e consumo de energia – mas também em função de condicionantes e limitações naturais do próprio processo decisório, nas áreas pública, tecnológica e empresarial.

Um grande obstáculo para a transição ao modelo sustentável é a inércia dos consumidores, que não tomariam de *motu proprio* a iniciativa de readaptar as suas fábricas, sistemas de transportes, estabelecimentos comerciais e residências, para o uso de novas formas de energia. Outro importante obstáculo está nos interesses enraizados há mais de um século na exploração, transporte, distribuição e comercialização de petróleo e eletricidade.

No Apêndice A foi estimada a duração das reservas brasileiras de petróleo e gás natural. É provável que o petróleo, o gás natural e o carvão continuem sendo empregados em escala mundial por muitas décadas, ainda que em escala decrescente. Entretanto, como esta tese visa a demonstrar que o Brasil dispõe de fontes renováveis de energia que lhe permitirão chegar à sustentabilidade, consideramos os combustíveis não renováveis apenas em relação ao papel que eles ainda têm a desempenhar durante a transição da matriz insustentável para uma sustentável. De resto, entendemos que seria incoerente propor um modelo sustentável, mantendo indefinidamente em sua matriz energética combustíveis não-renováveis, que ademais podem elevar a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera a níveis incompatíveis com a sustentabilidade.

Um país com a população, a extensão territorial e peso econômico do Brasil, que depende basicamente de petróleo para operar sua infra-estrutura de transportes de cargas e passageiros, fazer produzir setores importantes de sua indústria e praticamente toda a sua agricultura, não deve aguardar que os problemas fiquem mais graves, para só então adotar medidas destinadas a ajustar sua matriz energética ao cenário de escassez desses

combustíveis, cenário que será agravado pelas mudanças climáticas devidas aos gases de estufa.

Para evitar que o inexorável declínio da oferta de combustíveis fósseis cause tragédias tais como fome, epidemias, disputas geopolíticas e guerras, os padrões de consumo da sociedade devem ser modificados em curto prazo, e devem ser desenvolvidas tecnologias apropriadas ao uso das fontes renováveis de energia.

Modificar os padrões de consumo e desenvolver as tecnologias necessárias implica não apenas a redução dos desperdícios em geral, mas, principalmente, a reestruturação de modelos de urbanização, transportes, industrialização, construção civil, produção e distribuição de alimentos, etc.

Não se pode esperar que o mercado, sem forte controle estatal, crie condições para que a oferta de energia e a demanda da economia respeitem a uma política energético-industrial integrada, que conduza a um desatrelamento entre o crescimento econômico e o uso dos recursos naturais.

Ocorre que o mercado – com seus mecanismos de oferta e demanda, e de competitividade baseada em custos, não em impactos ambientais – exerce um papel decisivo nos processos de escolha de fontes de energia e expansão dos sistemas energéticos. Se estes mecanismos prevalecerem, as reservas de combustíveis fósseis poderão ser ampliadas, seja com a exploração de novas reservas de petróleo convencional, como as das Províncias Petrolíferas do Pré-Sal, seja mediante o emprego de técnicas avançadas para obtenção de petróleos não convencionais, obtidos a partir de minérios betuminosos e do próprio carvão, para não falar dos combustíveis sintéticos em geral. Neste caso estar-se-ia optando por caminhos que levarão a humanidade à extinção num prazo mais curto do que aquele imposto pela degradação natural da biosfera.

Por outras palavras, a sustentabilidade dependerá da criação e aplicação de mecanismos pelos quais a expansão dos sistemas e a escolha das fontes de energia não dependa das atuais estruturas de custos, mas sim da necessidade de se reduzirem os impactos provocados sobre o meio ambiente, pela produção e consumo de energia. Por isto não abordamos nesta tese a influência dos atuais custos nos processos de escolha de fontes de energia e expansão dos sistemas energéticos, embora admitamos que – uma vez implantados mecanismos adequados para lidar com a questão energética num contexto abrangente, no qual mínimos impactos ambientais e máximos ganhos de qualidade de vida sejam os objetivos procurados – novos custos relativos serão estruturados.

Para demonstrar a tese propusemos uma desvinculação do conceito de desenvolvimento econômico-social, daquele de crescimento da produção e isto foi feito mediante um ordenamento das diversas fontes de energia, em função dos respectivos impactos ambientais.

Tais impactos foram avaliados de uma forma semi-qualitativa e aproximada que, em síntese, consiste na aplicação dos princípios variacionais de máxima produção de entropia (MaxEP, ou MEP, do inglês *maximum entropy production*) e mínima produção de entropia, (MinEP, do inglês *minimum entropy production*), no processo de seleção das fontes de energia a serem exploradas, com vistas ao desenvolvimento sustentável do país.

Para se aplicar de forma rigorosamente quantitativa esta metodologia ainda é necessário investir muito em estudos teóricos e pesquisas de campo, para formar a base de dados necessária. Muitos desses estudos são de caráter eminentemente interdisciplinar, requerendo, portanto, a implantação de programas e projetos de cooperação das diversas escolas, faculdades e institutos da USP que, direta ou indiretamente, atuem nas áreas de energia, ecologia e pesquisa industrial – com universidades e instituições de pesquisa de outros estados, além de instituições ligadas ao governo federal, como a EMBRAPA.

Como conclusão, pode-se afirmar que é válida a tese de que o Brasil dispõe de fontes renováveis de energia que lhe permitirão passar da atual matriz energética – que é insustentável – para uma tendente à sustentabilidade em médio prazo, através de um processo de transição baseado na crescente racionalização do consumo de energia, paralelamente à redução do emprego de fontes não renováveis, tais como o petróleo e o gás natural que, ao final do horizonte de previsão considerado no trabalho, deverão ocupar posições declinantes, tendendo à anulação de meados para o final do presente século.

## APÊNDICE A

### Duração das reservas brasileiras de combustíveis fósseis

Demonstraremos em primeiro lugar que, se o crescimento exponencial prosseguir como tem ocorrido, a quantidade consumida durante um período de duplicação do consumo será igual ao total consumido em **todo** o tempo precedente.

De fato, se o crescimento foi exponencial, a quantidade ( $Q_1$ ) consumida até a data  $t_1$  foi:

$$Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} e^{rt_1}, \text{ onde:}$$

$r$  = taxa de crescimento do consumo;  $A_0$  = consumo atual e  $t$  = tempo decorrido.

Se o crescimento exponencial prosseguir, a quantidade ( $Q_2$ ) que será consumida no período de duplicação, de  $t_1$  a  $t_2$ , será:

$$Q_2 = \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} (e^{rt_2} - e^{rt_1})$$

Como, por hipótese, o intervalo [ $t_2 - t_1$ ] é um período de duplicação do consumo, tem-se  $e^{rt_2} = 2 e^{rt_1}$ , portanto,

$$Q_2 = \frac{A_0}{r} (2e^{rt_1} - e^{rt_1}) = \frac{A_0}{r} e^{rt_1} = Q_1,$$

isto é, o consumo no período de duplicação será igual ao total já consumido.

Seja agora  $R_t$  o volume total;  $Q_c$  a quantidade já consumida;  $A_0$  o consumo atual, ou seja, a partir do presente ( $t = 0$ ); e  $r$  a taxa anual de crescimento do consumo.

Evidentemente, o volume final, remanescente ( $R_f$ ), será igual ao total que existia, menos o que já foi consumido, ou seja,

$$R_t - Q_c = R_f = \int_0^t A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} (e^{rt} - e^0) = \frac{A_0}{r} (e^{rt} - 1)$$

Resolvendo para  $t$  (tempo em que as reservas remanescentes serão consumidas), obtém-se:

$$e^{rt} = \frac{R_f r}{A_0} + 1$$

$$\Rightarrow t = \frac{1}{r} \ln \left[ \frac{R_f r}{A_0} + 1 \right]$$

Cabe enfatizar que o modelo de crescimento exponencial oferece apenas uma indicação aproximada do prazo de duração das reservas, até porque não se pode afirmar que a taxa média de crescimento da produção se comportará de forma previsível. Essa taxa depende, entre outros fatores, do crescimento da demanda, de melhorias da produtividade e da

eficiência dos sistemas e equipamentos que operam com gás, da elasticidade-preço da demanda, etc.

Assim, a efetiva duração das reservas poderá estender-se por alguns anos, na medida em a produção passe por oscilações provocadas pelas crescentes dificuldades na exploração, que se refletirão sobre os preços e sobre o consumo.

Repetimos, portanto, que as estimativas esboçadas a seguir são apenas indicativas. Seu único objetivo foi o de delimitar um prazo para o planejamento e execução de medidas destinadas converter o atual modelo energético insustentável, num modelo sustentável.

Aliás, as conclusões a que chegamos não se modificam, caso as reservas de combustíveis fósseis durem mais uma ou duas décadas.

Previsões mais acuradas podem ser feitas por meio de conhecidos modelos desenvolvidos, por exemplo, pelo geólogo americano M. King Hubbert, em 1956, e pelo engenheiro francês Jean Laherrère, em 1998, entre outros.

No entanto, modelos desse tipo são geralmente derivados de curvas logísticas, ajustadas por parâmetros de difícil avaliação, sobretudo nos dias atuais. E sua aplicação conduziria a resultados que discrepariam dos aqui calculados em, no máximo,  $\pm 10$  a 15 anos, o que não altera as conclusões desta tese.

### ***Estimativa da duração das reservas de petróleo***

Segundo o Plano 2.030, as reservas de petróleo comprovadas e medidas ( $R_f$ ) são da ordem de  $2,385 \times 10^9 \text{m}^3$ . Por outro lado, de acordo com o Balanço Energético Nacional 2.007/2.006, em 2.006 o consumo ( $A_0$ ) foi de  $101 \times 10^6 \text{m}^3$ .

A taxa de crescimento do consumo de petróleo tem crescido em função do crescimento do PIB, porém, mediante aperfeiçoamentos tecnológicos, racionalização de modelos de transporte e substituições de parte dos combustíveis derivados de petróleo, por etanol e biodiesel – e também por força da elasticidade preço – é possível que essa taxa se estabilize em 3,0% ao ano, até 2.030, mesmo com o PIB crescendo à taxa de 4,1% ao ano, indicada no Plano 2.030.

Neste caso, as reservas durariam cerca de 17,8 anos, como mostra o cálculo abaixo:

$$t = \frac{1}{0,030} \ln \left[ \frac{2,385 \times 10^9 \times 0,030}{101 \times 10^6} + 1 \right] = 17,8$$

Além das reservas confirmadas e medidas, a EPE estima que há “reservas adicionais não descobertas”, no volume da ordem de  $6,709 \times 10^9 \text{m}^3$  (V. tabela 37). O Marco Regulatório definido pela Lei nº 9478/97, regulamentada pelo Decreto nº 2705/98, limita em 40% o direito



do Brasil sobre as novas reservas descobertas, de modo que se elas forem integralmente confirmadas, poderiam ser usados adicionalmente  $2,684 \times 10^9 \text{ m}^3$  para consumo interno. Assim, as reservas finais de petróleo seriam de  $5,069 \times 10^9 \text{ m}^3$  e, fazendo novamente o cálculo, vemos que, neste caso, a sua duração seria de 30,6 anos.

### ***Ordem de grandeza da duração das reservas de gás natural***

Segundo o plano 2.030 as reservas de gás natural efetivamente medidas são de  $326 \times 10^9 \text{ m}^3$ , e as reservas “adicionais não descobertas” são de  $4.891 \times 10^9 \text{ m}^3$  (V. tabela 10).

Constata-se que, nos últimos anos, o consumo de gás natural tem crescido a uma taxa média da ordem de 5,5% ao ano. Em 2.006 este consumo foi de  $8,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Se, por meio de programas de conservação de energia - e, principalmente, pela racionalização do uso do gás em termelétricas - essa taxa ficar igual à taxa de crescimento prevista no Plano 2.030 para o setor industrial (3,7% ao ano), a duração das reservas de gás natural seria de 24,5 anos, como está calculado abaixo.

$$t = \frac{1}{0,037} \ln \left[ \frac{326 \times 10^9 \times 0,037}{8,2 \times 10^6} + 1 \right] = 24,5$$

Supondo agora que se confirmem as “reservas adicionais não descobertas”, que são de  $4.891 \times 10^9 \text{ m}^3$ , as reservas finais a serem destinadas ao consumo interno seriam de  $(326 + 0,4 \times 4.891) \times 10^9 = 2282 \times 10^9 \text{ m}^3$ , pois o Marco Regulatório limita em 40% a parte das novas reservas a ser destinada ao consumo interno.

Refazendo o cálculo vê-se que, nesta hipótese, a duração das reservas de gás natural seria de 65,5 anos.

Como foi dito, existem modelos mais elaborados para se fazerem previsões desse tipo, entretanto sua aplicação não levaria a resultados que divergissem significativamente dos cálculos feitos acima.

Portanto, mesmo com as hipóteses otimistas a respeito das reservas “adicionais não descobertas” de petróleo e gás natural, sua duração fará com que a evolução da economia prevista no Plano 2.030 se interrompa bruscamente em médio prazo, por força de dificuldades de suprimento de petróleo e gás natural.

Seja como for, o princípio da precaução (V. capítulo 8) recomenda que, em prazo mais curto, a matriz energética brasileira já esteja bem adiantada na transição para a sustentabilidade.

## APÊNDICE B

### Ordenamento do território visando à sustentabilidade

As alterações relevantes do meio ambiente natural começaram com a agricultura não nômade, que surgiu há quase 9 mil anos na Mesopotâmia. Abria-se espaço para assegurar a alimentação dos agrupamentos humanos que aos poucos iam se formando – e, também, para fornecer insumos para as primitivas indústrias de cerâmica, de tecelagem e de metais (basicamente o cobre). Como as populações eram rarefeitas, aquelas alterações eram tópicas, não se refletindo sensivelmente nos ecossistemas regionais, mais amplos.

Veio depois a cultura irrigada de cereais, que tornou possível o plantio de culturas alimentares em áreas pequenas e acessíveis, oferecendo uma condição prévia para o adensamento populacional.

A primeira forma de urbanização, ou proto-urbanização, teve raízes religiosas: “os os gregos assim como os itálicos, acreditavam que a localização de qualquer urbe devesse ser escolhida e revelada pela divindade. Por isso, quando queriam fundar alguma urbe, consultavam sempre o Oráculo de Delfos” (de Coulanges, 1.987).

Até meados do século XIX não se cogitava de ordenar territórios para a agricultura e para o assentamento das populações. No capítulo 6 já tínhamos assinalado que os conceitos de região e de conurbação só vieram a ser introduzidos pelo biólogo, urbanista e sociólogo escocês Sir Patrick Geddes (1.854 – 1.932), em seus trabalhos sobre planejamento urbano, nos quais procurou definir uma unidade de medida comum, para explicar as correlações entre o uso de recursos materiais e o desenvolvimento econômico e social. Antes disso, considerava-se que o desenvolvimento da sociedade implicava ocupação *à outrance* de regiões virgens, derrubadas de florestas, aumento do consumo...

“Foi somente há 70 anos que surgiu a proposta de intervenção deliberada do poder público para induzir a localização de atividades. Isto é, para ordenar o território. Hoje praticamente todos os países o fazem de alguma maneira ... houve significativo progresso nesse propósito de diversificar as políticas governamentais em função das necessidades específicas das regiões, ou de determinadas regiões... a biosfera, em nível global, regional, nacional e local, está sendo submetida a pressões insuportáveis e prejudiciais para o próprio desenvolvimento e à qualidade da vida...O ordenamento territorial passou a ter, portanto, sentido bem mais preciso. Visa a organizar o processo de desenvolvimento no território, como alternativa ao puro e simples comportamento dos mercados, que tangem os residentes a se

deslocarem para encontrar oportunidade de trabalho e geração de renda. Trata-se de uma prática que pode ter perdido legitimidade com a ofensiva neoliberal do final do século XX, mas que já volta com toda a força para as agendas de desenvolvimento.....Há pelo menos quatro fatores que explicam essa volta do território ao domínio da ação pública: 1. ele está no centro das estratégias que visam a competitividade e a atratividade econômicas; 2. é nele que pode ser reforçada a coesão social; 3. é o melhor instrumento de modernização das políticas públicas, já que impõe abertura e transversalidade; 4. apesar de nele estarem ancoradas as instituições locais, permanece um domínio de ação de instâncias hierárquicas superiores cujos graus de liberdade são cada vez mais condicionados pelo processo de globalização e pela construção de acordos regionais supranacionais. Assim, renovar a concepção de território para uma política de ordenamento exige, antes de tudo, que ele seja entendido como ator de um esforço constante de desenvolvimento, mas de um desenvolvimento no qual a coesão social é simultaneamente uma aposta e uma alavanca. Neste sentido, três *insights* têm sido cada vez mais enfatizados: a necessidade de combinar concorrência com cooperação; a necessidade de combinar conflito com participação; e a necessidade de combinar o conhecimento local e prático com o científico” (Veiga, 2.006).

A partir do vôo orbital de Yuri Gagarin, no final dos anos 1.950, o público começou a tomar consciência das agressões causadas pelo homem à Terra, que ficaram bem visíveis nas imagens tomadas do espaço, mostrando cidades a lançar nuvens de fumaça e poeira à atmosfera, infra-estruturas desordenadas, florestas devastadas e mares poluídos.

A urbanização, que era considerada um indicador de progresso econômico, passou a ser vista de um modo mais seletivo. Havia que distinguir explosão urbana, de urbanização racionalmente orientada, era necessário estabelecer ritmos ideais de crescimento e impor limites ao tamanho das cidades.

Há cerca de 30 anos o historiador e economista Paul Bairoch analisou a questão à luz de condicionantes tais como clima, saúde pública, criminalidade, renda, lazer, etc. e procurou definir o efetivo populacional de uma cidade, acima do qual as vantagens econômicas e sociais da urbanização seriam anuladas pelo agravamento dos problemas de poluição, transportes congestionados, dificuldades de abastecimento, criminalidade e outros.

Sua conclusão foi a de que o efetivo ótimo estaria entre 200.000 e 500.000 habitantes, para os países desenvolvidos, e entre 300.000 e 500.000, para os países em desenvolvimento e estimou que, acima de 500.000 a 600.000 habitantes, anulam-se **todas** as vantagens da urbanização (Véron, 2.006).

Voltemos agora à estimativa da área disponível para a expansão da fronteira agrícola, tema que foi abordado de passagem no item 9.2.

O solo se comporta como se fosse um organismo vivo. Sua fertilidade depende de processos ligados à vida de diversas comunidades de organismos, numa camada superficial que raramente passa de 30 centímetros de espessura. Essa camada é formada pela decomposição, em solo úmido, de matéria orgânica que, ao longo dos séculos, vai se depositando na superfície e repondo o material levado pela erosão natural, que ocorre mesmo em áreas originalmente florestadas ou cobertas de prados, mas o processo é acelerado em áreas em que a vegetação natural é substituída pelas monoculturas de ciclo curto e reflorestamentos industriais.

A reconstituição da camada fértil do solo é muito lenta. Dependendo, entre outros fatores, do relevo e das características geológicas do terreno, estima-se que sejam necessários cerca de 200 anos para se reconstituir uma camada de apenas 1 centímetro de espessura (Brown, 1.982). Se a erosão for mais rápida do que a reposição, diz-se que o **Fator de Tolerância** foi ultrapassado.

Curiosamente, antes de Sir Patrick Geddes, Platão parece ter sido o único pensador que se preocupou com esse fenômeno. É assim que ele descreve a devastação das terras da Tessália, em seu diálogo Critias, escrito há 2.500 anos: “Quanto à excelência do solo, nossa terra superava a todas... a melhor prova disso é que a porção remanescente pode competir com qualquer outra região do mundo, na variedade de seus frutos e na riqueza das pastagens para animais de toda espécie”.....”Mas, além da superioridade dos frutos, a terra então se distinguia por produzi-los em abundância”....”muitas e grandes inundações se fizeram sentir, e com tamanhas revoluções da natureza, sem que durante todo esse período se depositasse a terra deslocada das alturas pelas águas...o que resta do passado é como os ossos de um corpo devastado por doenças.” (Platão, 2001).

Solos explorados em rodízio, com rotações anuais como no método Voisin, preservam a camada superficial de húmus que se acumula pela decomposição de resíduos vegetais, aos quais se juntam restos animais em menor escala, retendo água, fortalecendo a estrutura do solo e evitando a degradação dos lençóis freáticos. Em virtude de suas propriedades coloidais, o húmus é muito importante na constituição do solo, sendo a principal fonte de matéria orgânica para a nutrição das plantas.

Outro aspecto a ser considerado nos planos de ordenamento do território visando à sustentabilidade é a necessidade de se manterem talhões florestais, margeando as plantações e nelas intercalados. As florestas são indispensáveis para a estabilização da umidade

atmosférica, para o regime pluviométrico e, portanto, para a regularidade de todo o ciclo hidrológico.

Pouco se menciona, entretanto, o papel que as florestas desempenham no controle entomogênico microrregional. Embora este assunto fuja ao escopo de nossa tese, é interessante lembrar que os insetos, em particular aqueles considerados como pragas para a agricultura, formam a base das cadeias alimentares dos pássaros, que têm seu *habitat* nas florestas, mas recolhem a sua alimentação nos campos naturais e nas áreas exploradas pela ago-pecuária (Polan, 2006). A manutenção de maciços florestais associados à agricultura é, portanto, um meio muito eficiente para se controlarem pragas, sem a necessidade de pesticidas de origem petroquímica.

Ordenar a ocupação do território visando à sustentabilidade requer que, em qualquer plano de produção agrícola ou pecuária, os espaços a serem ocupados sejam delimitados nas dimensões suficientes para permitir a manutenção da estrutura e da fertilidade dos solos.

\* \* \*

Por fim, o ordenamento do território visando à sustentabilidade exigiria reformulações importantes no conceito de desenvolvimento urbano e nas práticas de implantação das infra-estruturas de transportes urbanos e interurbanos.

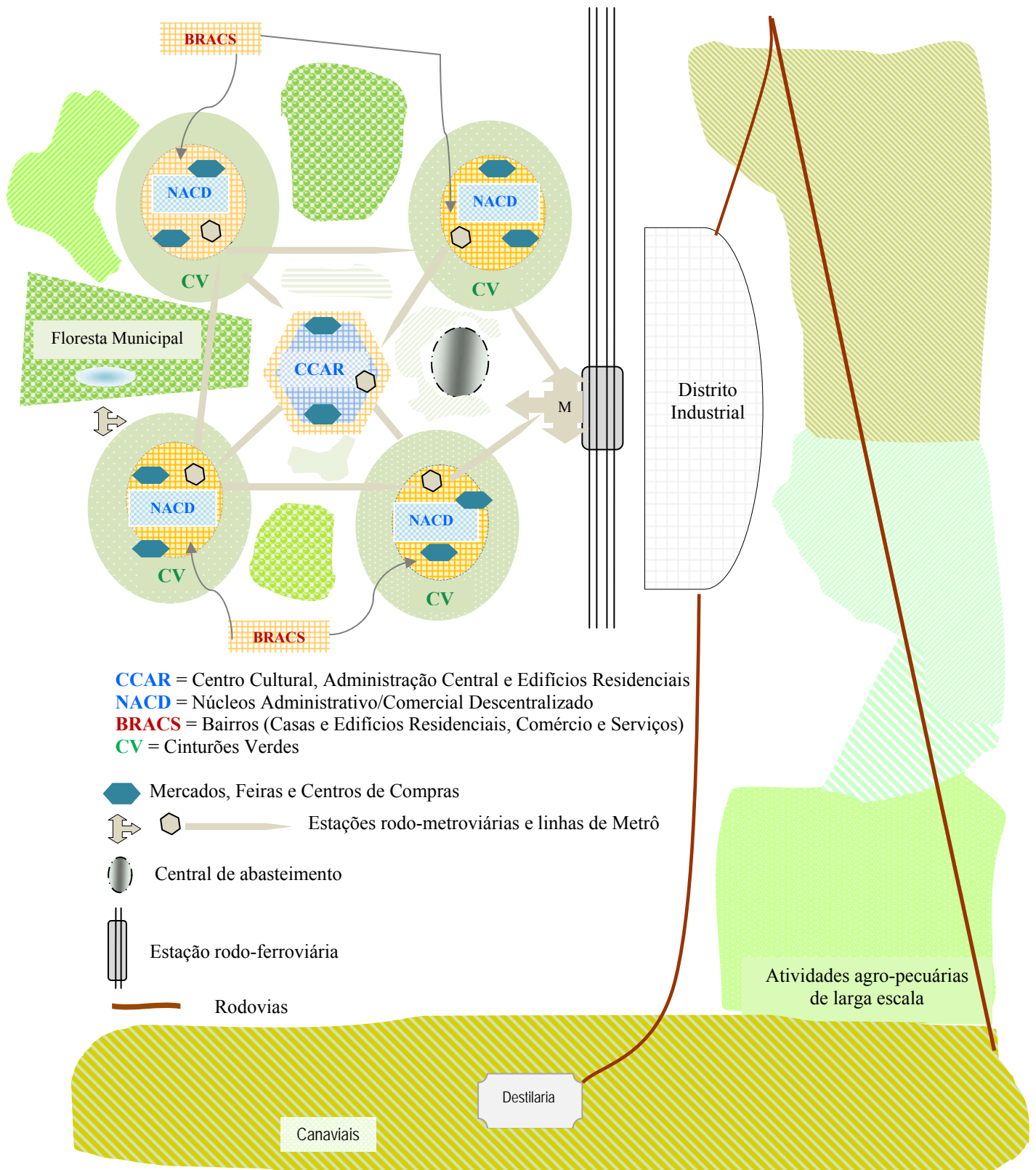
Já dissemos que um dos principais obstáculos para a para transição do modelo insustentável para um modelo sustentável está no setor de transportes, tanto o urbano (passageiros), como interurbano (cargas e passageiros).

Assim, para reduzir a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética, é necessário que o desenvolvimento das cidades obedeça a rigorosos planos diretores, voltados para a minimização das distâncias de transporte de cargas e para a oferta de transportes coletivos urbanos em nível de qualidade suficiente para mudar a preferência das pessoas pelo transporte individual, a favor do coletivo. Além da importância da cidade pólo comercial e “cérebro” de praticamente todas as iniciativas industriais e de produção agropecuária, não se pode perder de vista aquilo que é, provavelmente, a sua função mais importante, que é a de centro cultural e viveiro de criação artística.

Na figura 10, que é auto-explicativa, idealiza-se um esboço (muito simplificado) de “conurbação de baixa entropia”, concebida para atender aos requisitos mencionados acima.

Previu-se neste esboço um centro administrativo limitado a 100.000 habitantes, que poderia abrigar parte da população do complexo urbano (funcionários das repartições públicas, bancários e comerciários empregados no centro). Os bairros residenciais e “núcleos administrativos/comerciais descentralizados”, em número de 4, também teriam 100.000

habitantes cada um, de modo que a conurbação inteira teria 500.000 habitantes, ficando, portanto, no limite de sustentabilidade preconizado por Paul Bairoch.



**Figura 10** - Plano idealizado para uma conurbação de “baixa entropia”

As distâncias de transporte de gêneros para abastecer o conglomerado seriam consideravelmente reduzidas mediante a localização das explorações agrícolas em zonas estrategicamente localizadas na micro-região.

Em alguns casos seria possível implantar núcleos de “agricultura urbana” (Friedman, 1998), em cinturões verdes especialmente reservados para isso, em torno dos bairros residenciais (BRACS).

## APÊNDICE C

### Florestas industriais-energéticas

As atividades econômicas ligadas ao plantio e exploração de florestas industriais mobiliza, além de empresas de reflorestamento, diversos estabelecimentos industriais dos setores de caldeiraria e máquinas, mas, no Brasil, ainda há muito a ser feito no tocante ao desenvolvimento de equipamentos para o preparo de combustíveis de biomassa florestal e para a utilização desses combustíveis em processos térmicos, para indústrias tais como as de alimentos e bebidas, cerâmica, pequenas metal-mecânicas, etc.

A maioria dos países industrializados da Europa têm, em média, cerca de 30% de seus territórios ocupados por florestas industriais submetidas a regime de exploração sustentada, de modo que seria razoável estimar que partes consideráveis do território brasileiro possam destinar-se a empreendimentos de silvicultura. Essas florestas seriam plantadas em áreas não aproveitáveis para agricultura de ciclo curto, nem para pastagens. Seu plantio obedeceria a zoneamentos elaborados sob a orientação dos órgãos federais e estaduais competentes, evitando invasões de Parques Nacionais e reservas ecológicas e competições com as atividades de produção de alimentos. Para sua localização, seriam introduzidos, nos zoneamentos, critérios voltados para a minimização do transporte das matérias primas e combustíveis produzidos.

A madeira é uma alternativa tecnicamente viável para substituir materiais *energy intensive*, como ferro, aço, alumínio e plásticos. É possível usar madeira em diversos tipos de estruturas, tradicionalmente feitas de aço ou de alumínio. Peças de madeira especialmente tratada já foram empregadas em estruturas de automóveis, ônibus, embarcações e aviões.

A madeira é o único material de construção renovável e seu emprego proporciona importantes benefícios ao ambiente, pois, nos primeiros anos de crescimento, uma floresta produz 1,07 t de O<sub>2</sub> e absorve 1,47 t de CO<sub>2</sub> por tonelada de madeira formada, de modo que a colheita de uma floresta madura evita que o carbono armazenado na madeira seja liberado de volta à atmosfera.

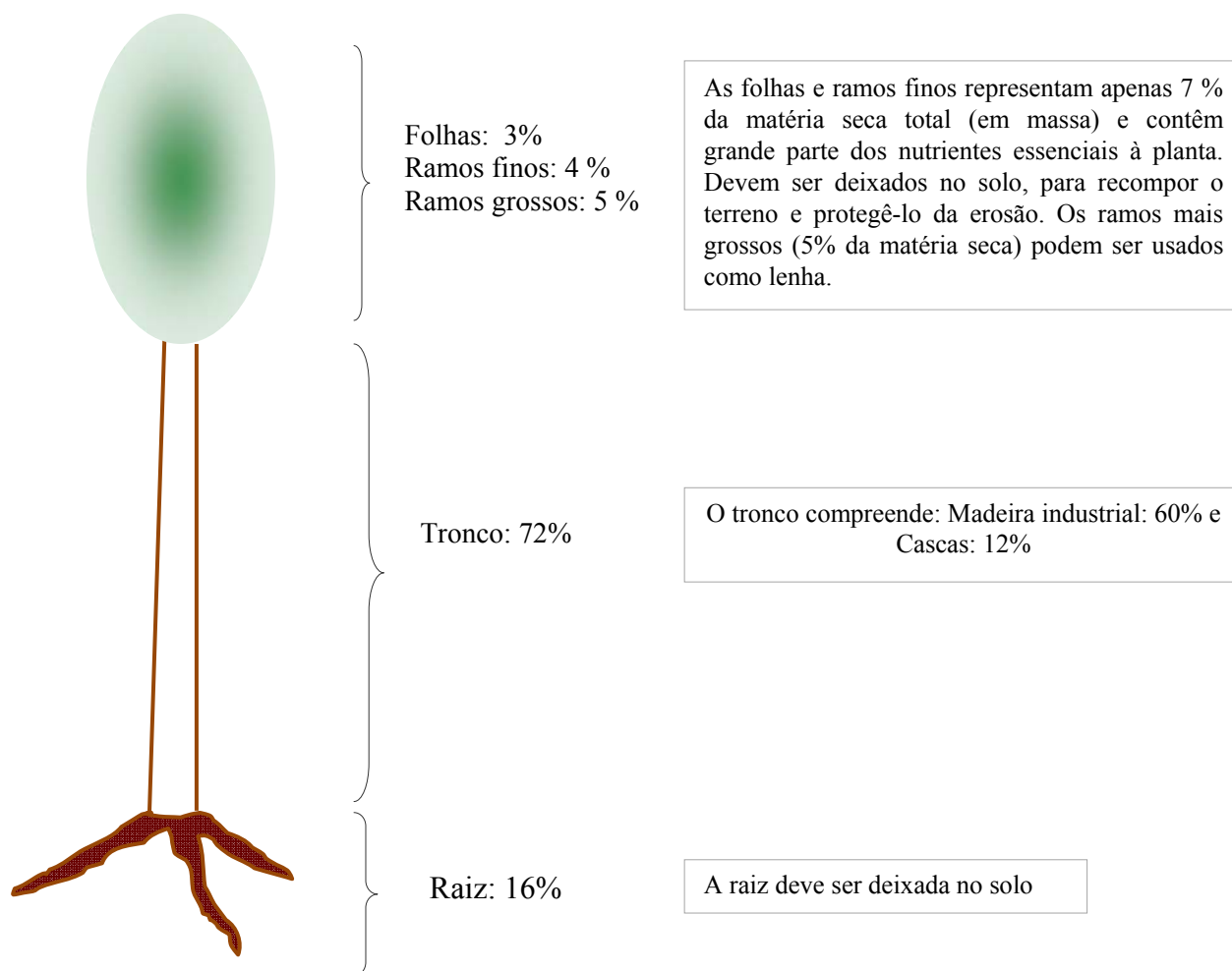
Uma casa de madeira de 100m<sup>2</sup> de área construída, por exemplo, armazena cerca de 12 toneladas de CO<sub>2</sub>, que tinham sido seqüestradas da atmosfera durante o crescimento das árvores das quais extraiu-se a madeira. Isto equivale às emissões de um automóvel médio, durante 7 anos. Outra vantagem é que casas, estruturas, revestimentos, embalagens e outros produtos de madeira são energeticamente mais eficientes do que produtos semelhantes, feitos de outros materiais. De fato, a produção de uma tonelada de madeira consome 5 vezes menos



energia do que uma tonelada de cimento, 14 vezes menos do que uma de vidro, 24 vezes menos do que uma de aço e 120 vezes menos do que uma de alumínio (APA, 2009).

A figura 11 indica a distribuição da biomassa pelas partes de uma árvore, em termos médios para diversas espécies.

Nas condições típicas das Regiões Centro-Sul e Sul do Brasil as atividades de plantio e manejo de florestas criam um emprego permanente em cada dez hectares de floresta.



**Figura 11** Distribuição da biomassa pelas partes de uma árvore

A raiz tem cerca de 16% da massa da árvore, mas não se deve retirá-la, pois isso contribuiria para a erosão e degradação do solo.

O suprimento da biomassa florestal para uso como matéria prima e combustível deve limitar-se ao tronco da árvore, sem a casca. As folhas, ramos finos e cascas representam apenas 19% da matéria seca total, mas contém cerca 80% dos minerais e nutrientes essenciais, absorvidos do solo durante o crescimento da árvore. Por isso, devem ser deixadas no terreno, para evitar sua depauperação.

A madeira pode passar por diversos estágios de transformação mecânica, para a obtenção de combustíveis nas seguintes apresentações:

- Lenha em forma de toletes,
- Cavacos combustíveis,
- Serragem
- Briquetes e *pellets* de pó de madeira, etc.

Para calcular-se o poder calorífico dos combustíveis de madeira é necessário conhecer o seu teor de umidade, e se este se refere à base seca ou úmida. De maneira aproximada, o poder calorífico dos combustíveis de madeira pode ser calculado pela fórmula empírica  $P_i = 4590 - 51,9 \times H$ , onde:

$P_i$  = Poder calorífico inferior, em kcal/kg

H = Umidade das peças de madeira (base úmida), em %.

Por exemplo: toletes extraídos de uma árvore recém-derrubada (50% de umidade, base úmida), têm o poder calorífico inferior  $P_i = 4590 - 51,9 \times 50 = 1.995$  kcal/kg.

Uma vez cortada a árvore, sua umidade vai caindo naturalmente, até atingir a umidade de equilíbrio (cerca de 30%) em 10 a 12 semanas. Cavacos secos ao ar durante um ano têm, portanto, um poder calorífico inferior igual a:

$$P_i = 4590 - 51,9 \times 30 = 3.033 \text{ kcal/kg.}$$

Com o emprego de estufas solares, seria possível chegar à umidade de equilíbrio em 9 a 10 semanas. O rendimento de uma floresta depende da essência florestal, regime de chuvas, permeabilidade e fertilidade das terras, índice de área folhar, incidência de radiação solar ao nível do solo e eficiência fotossintética. No estado de São Paulo, o incremento volumétrico médio de uma floresta de eucalipto *grandis*, submetida a um manejo como o acima descrito, pode atingir 30 a 35 m<sup>3</sup>, por hectare, por ano, considerando-se uma rotação completa (Ponce, 2.006).

Outro aspecto a ser considerado é a função ecológica da floresta. Em grandes extensões, o território brasileiro foi despido de sua cobertura florestal nativa. Uma nova cobertura protetora deverá aos poucos ser constituída, sob pena de se perderem para a agricultura, devido à erosão, as terras mais férteis do país. Do mesmo modo, as áreas das bacias de captação para as represas hidroelétricas também devem ser protegidas por florestas e matas ciliares a serem plantadas o mais cedo possível, pois muitas dessas bacias estão se assoreando. E nada impede que florestas de defesa do meio ambiente e matas ciliares sejam submetidas a regime de manejo auto-sustentado, que as transforme em fontes permanentes de energia e de matérias primas.

### **Esboço de estudo para uma fábrica auto-sustentável de casas de madeira**

A madeira é um excelente material para a construção de moradias. Com seu emprego, as unidades residenciais podem ser moduladas e produzidas em massa, aproveitando a experiência de outras indústrias, que têm linhas de produção em série. E a construção de habitações de madeira proporcionaria uma considerável economia indireta de energia, uma vez que para se construir uma casa de alvenaria, gasta-se de 5 a 8 vezes mais energia do que para se construir uma de madeira, de mesma área.

Apresenta-se a seguir um cálculo preliminar do consumo de madeira e de energia de uma fábrica auto-sustentável de casas populares, bem como o dimensionamento da área de uma floresta industrial a ser plantada para abastecer a fábrica.

A *fábrica* teria capacidade para produzir 520 casas populares por ano, funcionando, em média, 252 dias, para entregar duas casas por dia, exceto sábados, domingos e feriados.

As casas teriam 48 m<sup>2</sup> de área construída - com estrutura, paredes de dupla forração, forro e estrutura de telhado - totalmente de madeira. As telhas seriam de barro e o piso, de alvenaria. Uma casa com essas características requer cerca de 10 m<sup>3</sup> de madeira serrada (Ponce, 2.007)

A fábrica compreenderia uma serraria com capacidade para processar 860 m<sup>3</sup> de madeira por mês; e uma minitermelétrica, que usaria os rejeitos da serraria, para gerar energia em regime de autoprodução.

A *serraria* seria equipada com as seguintes máquinas:

- Uma serra de fita com carro porta toras, 1.100 mm de diâmetro: 60HP
- Uma reserra de fita, 800 mm diâmetro: 40 HP
- Duas serras refiladeiras de mesa: 2×10 HP
- Duas destopadeiras de pêndulo: 2×5 HP
- Um picador para resíduos: 50 HP
- 20 m de correias transportadoras para os cavacos: 10 HP

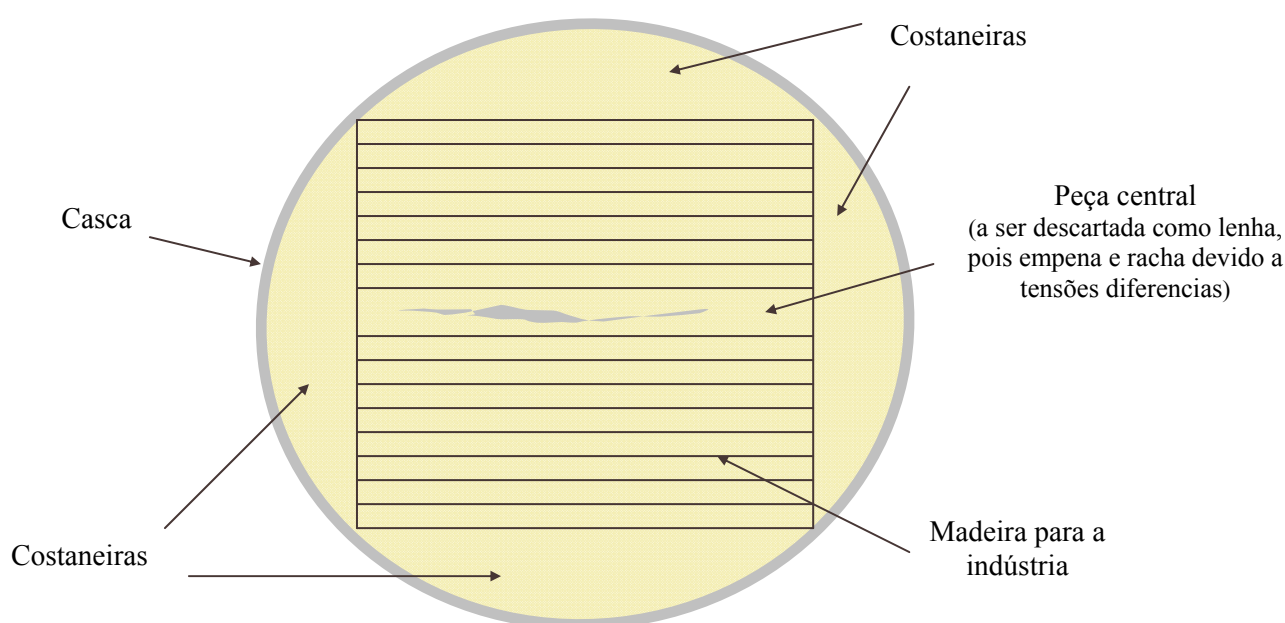
A potência total instalada seria, portanto, de 190 HP (142 kW) e a demanda seria de 50% dessa potência, durante 8 horas por dia.

A *minitermelétrica* consistiria de uma caldeira de 20 atmosferas e um conjunto turbo-gerador simples, de fabricação nacional. A eficiência global de um sistema com essas características é baixa (cerca de 16%), mas optando-se por esse tipo de instalação, consegue-se manter o investimento inicial no projeto num patamar acessível.

A *floresta industrial* seria plantada de forma a minimizar o transporte das toras, como ilustra esquematicamente a figura 13, mais adiante. No presente exemplo, a floresta teria 8 talhões, para suprir uma fábrica localizada no centro.

No ciclo de aproveitamento, uma floresta industrial produz 60% de toras sem casca e 40% de rejeitos tais como raízes, cascas, ramos e folhas, que devem ficar no terreno, exceto os ramos mais grossos, que podem ser vendidos como lenha.

Do processamento das toras na serraria obtém-se 50% de madeira industrial e 50% de resíduos combustíveis como pontas, costaneiras, aparas, lascas e serragem.



**Figura 12** - Desdobro de um tronco, mostrado em corte transversal

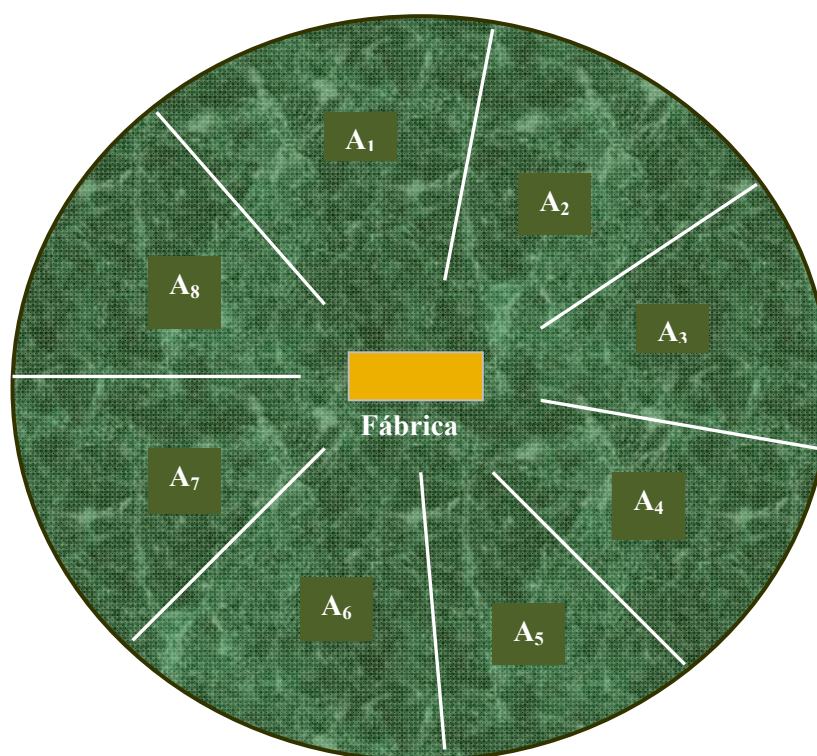
Num ciclo completo, cerca de 30% da produção da floresta podem destinar-se à geração de energia e 30% constituem produtos finais, tais como taboas, caibros, ripas e peças para construção de casas ou fabricação de móveis e embalagens, entre outras coisas, como ilustra a figura 12.

Num projeto florestal de uso múltiplo, otimizado para aproveitar ao máximo o potencial produtivo do terreno, sem depauperá-lo, deve-se começar por um plantio mais denso, com espaçamento de 3m x 2m, por exemplo (1.666 árvores por hectare).

Em condições normais, um tal plantio cresce algo em torno de 30 a 35 metros cúbicos por hectare por ano, até o sétimo ano, quando o crescimento entra em declínio. Faz-se então um primeiro desbaste, mediante o corte de 50% das árvores (aquelas que ainda não têm

diâmetro adequado para serraria, mas podem ser usadas para celulose ou para combustíveis, pontaletes, mourões de cerca, etc).

Os troncos dessas árvores perfazem cerca de 80 metros cúbicos madeira, cuja venda gera caixa para o projeto. As árvores que ficam voltam a crescer expressivamente e, por volta do sétimo ano, atingem dimensões adequadas para serraria. Faz-se aí outro desbaste de 50%, depois do qual restam cerca de 400 árvores, para serem cortadas em torno do décimo ano, podendo-se aí optar por outro desbaste de 50%, deixando cerca de 200 árvores para o corte final no 16º ano. Desse modo utiliza-se todo o potencial de crescimento e agregação de valor à madeira, que aumenta com o diâmetro das toras.



$$A_1 = A_2 = \dots = A_8 = 72,5$$

**Figura 13** - Disposição da floresta industrial em relação à fábrica.

O rendimento de uma floresta depende da essência florestal, regime de chuvas, permeabilidade e fertilidade das terras, índice de área folhar, incidência de radiação solar ao nível do solo e eficiência fotossintética.

No estado de São Paulo, por exemplo, o incremento volumétrico médio de uma floresta de eucalipto *grandis*, submetida a um manejo como o acima descrito, pode atingir 30 a 35 m<sup>3</sup>, por hectare/ano, considerando-se uma rotação completa (Comunicação pessoal, Ponce, 2.006).

A essência florestal considerada neste exemplo seria o eucalipto *grandis* e a retirada das árvores de diâmetro adequado para as casas poderia começar no 8º ano, obtendo-se um rendimento volumétrico mínimo da ordem de  $30 \text{ m}^3$  (sólidos), por hectare, por ano.

Como foi dito acima, cerca de 40% do material das árvores (raízes, cascas, folhas, etc) devem permanecer no terreno e 60% ( $18 \text{ m}^3$ ) destinam-se ao processamento na serraria, com um aproveitamento de 50% para peças usadas na construção das casas, e 50% para uso como combustível.

Assim, cada hectare de floresta produziria, por ano,  $9 \text{ m}^3$  de madeira para a construção das casas e  $9 \text{ m}^3$  para alimentar a caldeira da minitermelétrica.

Teríamos, portanto, uma produtividade média da ordem de 0,9 casa, por hectare, por ano, durante toda a rotação; pó conseguinte, para produzir as 520 casas por ano em ciclo permanente, dever-se-ia plantar uma floresta industrial de 578 hectares, subdividida em 8 talhões de 72,5 hectares, manejados e replantados sucessivamente, num ciclo permanente.

**Consumo de energia e balanço energético** - Como foi dito, a fábrica (142 kW) funcionaria com uma demanda de 50% da potencia instalada durante 8 horas por dia, 252 dias por ano, de modo que (admitindo-se uma eficiência elétrica da ordem de 80%) o consumo de eletricidade seria de 178.920 kWh (153.871.200 kcal), por ano.

Para gerar essa energia com a mencionada eficiência térmica de 16%, a minitermelétrica consumiria 961.695.000 kcal, por ano. As operações da serraria deixariam, por ano,  $520.000 \text{ m}^3$  de resíduos combustíveis, que podem ficar armazenados até que sua umidade caia para cerca de 30%, com o que seu poder calorífico chega a 3.030 kcal/kg (ou  $1.820.000 \text{ kcal/m}^3$ , admitindo-se que sua massa específica seja de  $600 \text{ kg/m}^3$ ). Vê-se então que o balanço energético da fábrica associada à floresta seria positivo, pois para gerar as 961.695.000 kcal por ano, a minitermelétrica consumiria apenas  $529 \text{ m}^3$  de resíduos combustíveis. Sobrariam, portanto,  $4.671 \text{ m}^3/\text{ano}$ , de combustíveis que podem ser vendidos para pequenas indústrias que usem lenha em seus fornos e caldeiras. Aí não foram incluídos os galhos de diâmetro superior a 5 cm, não aproveitáveis como madeira industrial, mas podem ser usados como lenha. Esse material perfaz, aproximadamente, 5 % da massa das árvores.

## APÊNDICE D

### O etanol como matéria prima

#### D.1 Produção de hidrogênio por reforma de etanol

Quando estiverem em condições de uso as tecnologias e *engineering* para o conjunto de sistemas envolvidos na produção, armazenamento, distribuição e usos finais do hidrogênio este vetor energético poderá ir aos poucos substituindo combustíveis derivados do petróleo tais como diesel, gasolina e gás natural, que atualmente movimentam praticamente toda a frota de veículos automotores. Para isso, os motores de combustão interna, cuja eficiência termodinâmica fica, na melhor hipótese, em torno de 30%, serão substituídos por células a combustível alimentadas a hidrogênio, cuja eficiência pode chegar a 60%.

Como foi dito no capítulo 1, os combustíveis fósseis têm limitações que vão se tornando cada vez mais evidentes, não apenas por serem esgotáveis, mas, principalmente, porque são os principais responsáveis pelo aumento da taxa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera.

Entre as vantagens do hidrogênio, a mais citada é que sua combustão não gera CO<sub>2</sub>, no entanto essa vantagem deve ser considerada com cautela pois, tomando-se o ciclo completo, da produção à combustão, ela só prevalece se o hidrogênio não for produzido como o é atualmente em sua quase totalidade, ou seja, por reforma de combustíveis fósseis, como o gás natural, o carvão mineral e alguns derivados do petróleo.

Outra vantagem frequentemente lembrada seria o alto poder calorífico do hidrogênio (120 MJ/kg, ou cerca de 28.700 kcal/kg), em comparação com a gasolina automotiva (45 MJ/kg, ou 10.800 kcal/kg). Entretanto sua densidade energética é baixa em termos volumétricos: 1 litro de gasolina equivale a 4,6 litros de hidrogênio comprimido a 700 bar.

Na definição de uma política para o hidrogênio, é natural que se subdivida a questão em quatro linhas, a saber:

- Produção de hidrogênio em larga escala. Análise comparativa entre as linhas de produção de hidrogênio a partir hidrocarbonetos e de biomassas, relativamente aos impactos sociais (criação de empregos em zona rural, etc.) e ambientais (redução das emissões de CO<sub>2</sub>);
- Infra-estrutura de transporte, distribuição e armazenamento (este é um ponto crítico);
- Usos finais do hidrogênio, seja como vetor energético associado à eletricidade, seja em aplicações diretas, o que implica atividades de pesquisa e desenvolvimento de sistemas e equipamentos apropriados, sem esquecer a necessidade de se promoverem, desde já, estudos

voltados para a implantação, na época oportuna, de um sistema de normas, códigos e padrões específicos para o Brasil;

- Aspectos sócio-culturais de uma futura economia do hidrogênio: divulgação, ensino técnico de temas correlatos, legislação, etc.

\* \* \*

Independentemente de considerações de caráter ambiental, deve-se reconhecer que a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis é simples e eficiente.

Por isso, nos países industrializados, somam-se os interesses – e os lobbies – das indústrias automobilística, do gás e do carvão, para pressionar os respectivos governos a criar a infra-estrutura básica para a implantação de sistemas (ou redes) nacionais de distribuição de hidrogênio para automóveis, o que requer o desenvolvimento, em curto prazo, de um completo sistema de códigos, normas e padrões, inclusive para a implantação e operação de postos de distribuição de hidrogênio.

Para o Brasil, não há interesse na adoção dessas prioridades.

Diante de vantagens relativas regionais, como o potencial hidroelétrico, o clima favorável (horas de insolação, no caso) e a extensão de terras apropriadas para o plantio de culturas adequadas, fica evidente que, no Brasil, a transição da frota a combustíveis fósseis, para uma a hidrogênia pode, passar por uma etapa intermediária, que seria a substituição dos derivados de petróleo pelo etanol, pois, para isso, já se desenvolveram tecnologias e acumulou-se uma considerável experiência com o Proálcool, programa já consolidado e bem sucedido.

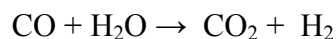
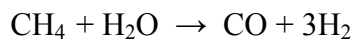
Paralelamente a isso, realizar-se-iam, nas instituições que já se tenham iniciado na linha dos sistemas automotivos a hidrogênio, pesquisas voltadas para o desenvolvimento industrial desses sistemas. Especial atenção seria dispensada aos veículos de transporte coletivo (ônibus). Outra aplicação de grande importância seria a do uso do hidrogênio em instalações de geração distribuída de energia elétrica.

Atualmente quase todo o hidrogênio usado no mundo é produzido a partir de hidrocarbonetos. Aí se inclui a rota do gás natural (metano), que é a mais eficiente, por ser o metano o composto de maior conteúdo mássico de hidrogênio. De fato, tomando-se os pesos atômicos do carbono (12) e do hidrogênio (1), vê-se que o metano (CH<sub>4</sub>) contém hidrogênio na proporção de 4 para 16, isto é, 25%.

A simplicidade e eficiência da rota de produção de hidrogênio a partir do metano tornará difícil viabilizar economicamente outros processos, em curto prazo.



Esquemáticamente, esta rota consiste na reforma do metano para a produção de gás de síntese, o qual, reagindo em seguida com mais vapor de água, num conversor aquecido a cerca de 500°C, converte em dióxido o monóxido de carbono formado, liberando mais hidrogênio, assim:



Passando-se essa mistura por uma torre de absorção, retira-se parte do CO e do CO<sub>2</sub> e, naturalmente, dos resíduos do próprio metano e do nitrogênio (N<sub>2</sub>) do ar, daí resultando uma mistura com a seguinte composição, aproximadamente: 69% de H<sub>2</sub>; 24% de N<sub>2</sub>; 4,6% de CO; 1,7% de CO<sub>2</sub> e 0,7% de CH<sub>4</sub>. A obtenção de hidrogênio puro a partir dessa mistura ainda é economicamente inviável, embora venha sendo objeto de importantes investimentos em projetos de P&D, nos países industrializados.

A gaseificação de derivados de petróleo de cadeia mais complexa, ou mesmo de carvão, também produz gás de síntese, mas nesse caso, evidentemente, para se produzir a mesma quantidade de hidrogênio, coloca-se mais CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Pode-se entrar na mesma rota a partir das biomassas, sem desequilibrar o balanço de CO<sub>2</sub> na atmosfera, já que, como foi visto no capítulo 5.2.2, ao se formarem por fotossíntese as plantas retiram da atmosfera a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> que é posteriormente reemitida, quando se recomeça o ciclo, a partir da pirólise da biomassa formada no referido processo.

## ***D.2 O etanol como matéria prima para a indústria química***

Na medida em que mais problemática fica o acesso ao petróleo e ao gás natural, torna-se mais interessante a via alcoolquímica para a produção de produtos tais como, entre outros, o polietileno, a borracha sintética e o ácido acético e seus derivados (Menezes, 1.980). A alcoolquímica apresenta a vantagem de ser uma indústria de “baixa entropia”.

A seguir apresentam-se exemplos de derivados acéticos importantes, que já foram produzidos no Brasil, mas deixaram de sê-lo quando o preço da nafta vendida pelas refinarias brasileiras passou a competir vantajosamente com o álcool produzido a partir da cana:

- O *ácido acético* (ou ácido etanóico) é uma molécula central em praticamente toda a bioquímica, sendo utilizado na fabricação de vários sais orgânicos e inorgânicos. Pela via da alcoolquímica, é produzido por oxidação do aldeído acético, que pode ser obtido por desidrogenação do álcool. Pela via petroquímica, também é obtido pela oxidação do aldeído

acético, com a diferença de que o aldeído é produzido por oxidação do etileno.

- O *anidrido acético* é muito utilizado como agente de acetilação e desidratação na síntese de produtos orgânicos para a indústria química e farmacêutica, principalmente usado na acetilação da celulose a acetato de celulose, para filmes fotográficos. Na indústria têxtil, é utilizado na obtenção do acetato de celulose, ou *rayon*. Também é usado para produção de filtros de grande poder de absorção e até de explosivos (nitrocelulose). O anidrido acético é produzido por *cracking* do ácido acético, que pode originar-se de álcool ou de petróleo.
- O *acetato de etila* é um éster simples, de ampla aplicação industrial. É um solvente, relativamente pouco volátil que, em muitas aplicações, concorre com a metil-etil-cetona. Pode ser obtido pela reação de ácido acético com álcool etílico. E o ácido acético pode ser obtido do álcool ou do petróleo. No caso da indústria alcoolquímica, o álcool que reage com o ácido vem da agricultura, enquanto na petroquímica, vem da hidratação do etileno.
- O *butanol* é atualmente usado como solvente. Em mistura a 85% na gasolina, poderá ser usado como biocombustível, com vantagem sobre o etanol, no tocante ao rendimento. Pela via alcoolquímica, o butanol pode ser produzido a partir de aldeído acético, proveniente da desidrogenação do álcool. Na petroquímica é obtido pela reação de propileno com monóxido de carbono.
- O *acetato de butila* é um poderoso solvente, muito empregado nas indústrias de tintas, vernizes e *thinners*, que concorre com a metil-isobutil-cetona. Por via ácoolquímica, é obtido pela reação de ácido acético com butanol. Na petroquímica pode ser obtido diretamente, nas refinarias de petróleo, e seu sucedâneo, o metil-isobutil-cetona, pode ser obtido a partir da acetona.
- O *acetato de vinila* é precursor na obtenção de um importante polímero, o acetato de polivinila (PVA). Pode ser produzido pela reação de ácido acético e acetileno. A diferença entre os processos alcoolquímico e petroquímico é que, neste, o ácido acético é obtido a partir do etileno.
- O *octanol* é um solvente orgânico altamente miscível. Pela via alcoolquímica, pode ser produzido a partir do aldeído acético, obtido por desidrogenação do álcool. Na petroquímica, parte-se do butiraldeído, que é obtido pela reação de propileno com monóxido de carbono.

Os diagramas a seguir esquematizam as vias petroquímica e alcoolquímica para a produção de derivados acéticos (Unger, 1.968).



## Referências

**Abraf, 2009**, Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2009.

**Abramovay, R.** “Descasamento, desligamento: abrindo a caixa preta da vida econômica”, *in* Valor Econômico, 6 de março de 2009.

**Aleklett, K.**, Oil: A Bumpy Road Ahead, World Watch Magazine: Jan/Feb. 2006.

**D’Almeida, C.E.**, Uso Múltiplo das Bacias Hidrográficas em bases Sustentáveis, Painel Desenvolvimento Sustentável no Eixo Rio-São Paulo, FBCN, Rio, 1.992.

**Alvim, C. F.**, Valor Agregado por Setor e o Consumo de Eletricidade, Economia & Energia, nº 26, 2001.

**Anthony, D;**Telegin, D.Y; Brown, D., The Origin of Horseback Riding, Scientific American, December, 1991, pp. 44 - 48.

**Aristoteles**, *Politics*, II, 1.2 - 1.2.3; V, 1.10 - 1.12 e VII. 14 – 15/Tradução inglesa de B. Jowett, 1.885 (Dover, 2.000, p.54 # 288 a 293).

**Arrhenius, S.**, On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, *Philosophical Transactions of the Royal Society and Journal of Science*, april, 1896, pp. 237 a 276 (Extract from a paper presented to the Royal Swedish Academy of Sciences, 11<sup>th</sup> December, 1895).

**Artaxo, P**, Mudanças Climáticas Globais e Alternativas para o nosso Futuro, Palestra em seminário do PIPGE/USP, 7 de dezembro de 2007.

**Ávila, R.**, Balança financeira fuga de capitais, *in* Monitor Mercantil, 7 de maio de 2009.

**Bandeira, P.S.**, Institucionalização de Regiões no Brasil, *Ciência e Cultura*, jan/mar, 2.006.

**Barghini, A**, 1971: Le origini del motore a vapore, *Le Scienze*, 36, Agosto, 1971, p. 59.

**Barghini, A**, 2009, Il territorio fra alimenti ed energia, *in* RURALITA, Donizelli, 2009

**Bessa Antunes, P.B:** *Direito Ambiental*, Ed. Lumen Juris, 2.004, pp. 35 - 37.

**Boardman, N.K.** and Larkun, A.W., Biological Conversion of Solar Energy, *in* Solar Energy, Pergamon Press, p. 126 (Série de conferências realizadas na Universidade de Sydney, em 1.974).

**Bourg, D;** Sclegel, J.-L., 2001, Parer aux risques de demain – Le principe de précaution, Seuil, Paris , pp.137 – 143.

**Bowman, D. et all**, Fire in the Earth System, *Science*, 324, 24 apr. 2009, pp. 481 - 482.

**Bringezu, S. et al**, International comparison of resources use relative to economic growth, *Ecological Economics*, 51, 2004, pp. 97 – 124.

**Brito, S.S**: Situação Atual e Perspectivas da Energia Nuclear, in Lepecki, coord. *et all*, Introdução à Geração Núcleo-Elétrica, Imprensa UFMG, 1968

**Brown, L.**, A Construção da Sociedade Auto-Sustentável – Tradução e publicação de L. Navarro Jr., São Paulo, 1.982, pp. 29 a 41.

**Campbell, C.J.**, 2.005, Oil Crisis, Multi Science Publishing Company, pp.126 -147.

**CME**, 1.995 (Centro da Memória da Eletricidade), A Eletrobrás e a História do Setor de Energia Elétrica no Brasil.

**Carvalho, J.F.**, A Exploração das Florestas através dos Tempos, *Jornal do Brasil*, 5 de dezembro de 1983.

**Carvalho, J.F.**, Energia Verde, *Ciência Hoje*, novembro de 2.006, p. 32.

**Carvalho, J.F. et all**, O Brasil é Viável?, Editora Paz e Terra, 2006, pp. 23 – 28 e p. 38.

**Carvalho, J. F.**, O Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, in Aveline, A; Menezes, L. C; Rosa, L.P; Vasconcellos, L.A.Z; Cerqueira Leite, R: O Brasil Nuclear – Uma Anatomia do Desenvolvimento Nuclear Brasileiro, Ed. TCHE, Porto Alegre, 1987 p. 49 – 50.

**Carvalho, J.F.; Sauer, I.L.**, Does Brazil need Nuclear Power Plants?, *Energy Policy*, Jan, 2009.

**Carvalho, J.F., Jannuzzi, G., M.**, Aspectos Éticos do Modelo de Planejamento do Setor Elétrico, *Revista Brasileira de Energia*, Vol. 3 n° 2, 1994.

**Cassé, M.**, 2.004, Soleil Nucléaire, in CLEFS CEA, n° 49, p. 7 – 8.

**Catling, D.**, Coupled Evolution of Earth's Atmosphere and Biosphere - in *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy*, Springer, 2.005, p.195.

**Centre d'information sur l'énergie durable** et l'environnement, 1996, disponível em <http://www.ciede.org.ma/siedcc/siedcc/InfosTechniques/EE.html>

**Cipolla, C.M.**, 1.964: The Economic History of World Population, Pelican Books.

**COMESP, 2009**, Draft Summary of the Report of the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress – “Commission *Sarkosi*”.

**Comin, A.**, De Volta para o Futuro, Política e Reestruturação do Setor Automobilístico, CEBRAP, 1.993.

**Condorcet**, Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain, 4<sup>o</sup> Éd., Agasse, Paris, 1798, pp. 362 - 365.

**Consommation** d'électricité en France en 2007, disponível em: [http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_1509.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1509.php).

**Convenção de Paris**, 1992, disponível em: <http://jus2.uol.com.br/doutrina/texto.asp?id=5879>

**Cooper**, J.P., *Photosynthesis and Productivity in Different Environments* - Cambridge University Press, 1.975.

de **Coulanges**, F., *La Cité Antique*, trad. portug. Aguiar, F., Martins Fontes, 1.987, p. 138 – 146.

**Cournac**, L, 2.005, Comment optimiser la production d'hydrogène d'une algue verte, *in* CLEFS CEA, Hiver 2004/2005, pp. 49 - 51.

**Cowling**, S.A. *et al*, Contrasting Simulated Past and Future Responses of the Amazonian Forest to Atmospheric Change, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 359, 2.004.

**Daly**, H, Economics in a Full World, *Scientific American*, Sept. 2005, p. 102 – 103.

**Dewar**, R.C., 2.005: Maximum Entropy Production and Non-equilibrium Statistical Mechanics, *in* *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy*, Springer, 2.005 (p. 47 – 53).

**Dumon**, R., *La Forêt - source d'énergie et d'activités nouvelles*, Masson, 1980.

**Durand**, J.D., 1974, *Historical Estimates of World Population*, University of Pennsylvania Population Center, Analytical and Technical Reports, Number 10.

**Dyson**, F. J., Energy in the Universe, *Scientific American*, Sept., 1971, p. 56.

**Embrapa**, *Matérias-Primas para a Produção de Biodiesel*, 2.005

**EPE**, 2006, *Balanco Energético Nacional 2.006/Ano Base 2.005*, EPE.

**EPE/MME**, 2.006, *Plano Nacional de Energia 2.030*.

**Fermi**, E., *Thermodynamics*, edição Dover, 1957 (p. 48).

**Foukal**, Peter *et al*, Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate, *Nature*, 443, 2006, p. 161 – 165.

**Friedman**, Y. *Alternatives énergétiques ou la civilisation paysanne modernisée*, Éditions Dangles, 1998.

**Gasques**, J.G., *Palestra apresentada no 47º Congresso Anual da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, Porto Alegre, 2008.

**Glansdorff, P;** Prigogine, I., Structure, Stabilité et Flutuactions, Masson, 1971, p. 26 – 31, 1971.

**Goodland, R.,** Daly, H., Environmental Sustainability, Universal and Non Negotiable, Ecological Applications, 6(4), Nov. 1996, pp. 1.003 – 1.004.

**Gribbin, J.,** Global Warming, Dorling Kindersley, 2.002.

**Hayes, D.;** Raios de Esperança – a transição para um mundo pós-petróleo, Cultrix, 1.977.

**Hémery, D.;** Debeir, J.- C.; Déleage, J.- P. - Uma História da Energia – Ed. Universidade de Brasília, 1.986, pp. 45 – 75.

**Hirsch, R.F.,** Power Loss – The Origins of Deregulation and Restructuring in the American Utility System, The MIT Press, 2.001, pp. 33 a 53).

**Hopkins, J.N.N.,** The Cloaca Maxima and the Monumental Manipulation of Waters in Archaic Rome, The Waters of Rome, N° 4, March, 2007 , pp. 2-6.

**Hydro Power** and Dams World Atlas, 2001

**IBGE,** Projeção da População do Brasil: 1980-2050, Revisão 2008, em:  
[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao\\_da\\_populacao/2008/default.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2008/default.shtm)

**IEA,** International Energy Agency, World Energy Outlook, 2.006.

**Instituto Fernand Braudel** de Economia Mundial, Documento N° 43/2008.

**Ioanides, T.,** Thermodynamic analysis of ethanol processors for fuel cell applications, Journal of Power Sources, 92, 2001.

**Jacomy, B,** 1.990., Une histoire des techniques, Éditions du Seuil, 1990, pp. 24 – 83.

**De Jong, B.,** Net radiation received by a horizontal surface on earth, Delft University Press, 1.973.

**Juretić, D.;** Zupanović, P., The Free-Energy Transduction and Entropy Production in Initial Photosynthetic Reactions, *in* Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy, Springer, 2005, p. 162.

**Kleidon, A.;** Lorenz, R., Entropy Production by Earth System Processes, *in* Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy, Springer, 2.005, p. 2.

**Kolbert, E.** A Terra em Perigo, Editora Globo, 2006, pp. 50 - 69.

**Kreith, F.** and Kreider, J, Principles of solar engineering, Mc Graw Hill, 1978.

**Kunstler, J.H.,** La fin du pétrole – Le vrai défi du XXI<sup>e</sup> siècle, PLON, 2005, pp. 22 – 31.

**Lamberts, R. et all,** Eficiência Energética na Arquitetura, PW Editores, 1997

**Leme Machado**, P. A, Direito Ambiental Brasileiro, São Paulo, Malheiros, 2001, pp. 66 - 67.

**Lotka**, A. Natural Selection as a Physical Principle, PNAS/Biology - Vol. 8, 1922, p. 151 – 154.

**Macedo**, I.C., Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil, *in* Biomass and Bioenergy, v. 14, 1998.

**Mathis**, P. – Les centres réactionnels photosynthétiques *in* Clefs CEA (Revista do Commissariat à l'Énergie Atomique), n° 5, abril de 1987, pp. 40 - 48.

**Menezes**, T.J.B., Etanol, o combustível do Brasil, Editora Agronômica Ceres, 1.980 pp. 12 - 37.

**Montanelli**, I, História de Roma, Editora Record, 1969, pp. 95 – 99.

**Montesquieu**, Lettres Persanes, Lett. CXV à CXXV, Ed. Flammarion, 2005, p. 228 - 247

**Mulligan**, J.F.; Herz, H.G., “An Unpublished Lecture by Heinrich Hertz: On the Energy Balance of the Earth”, Am. J. Phys., 65, jan. 1.997, pp. 36 - 45.

**Ministério** das Cidades, SNIS, 2006

**Nastari**, P., 2.003, O Desenvolvimento do Mercado de Álcool e o Potencial para Geração Distribuída, VI Seminário Internacional de Geração Distribuída, INEE/WADE, 2.003.

**North**, Douglass C., p. 23: Understanding the Process of Economic Change, Institute of Economic Affairs, 1.999.

**Novick**, S., The Electric War – The Fight over Nuclear Power, Sierra Club Books, 1.976, 117 - 131.

**Nuclear** Power in France, World Nuclear Association, 2009, in: <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html>.

**Odum**, H. T., Odum, E., C., Hombre y Naturaleza – Bases Energeticas, Ed. OMEGA, Barcelona, 1.981, p. XIV a XVIII.

**Oliverio**, J.L., Como Otimizar a Energia Elétrica Gerada na Indústria da Cana de Açúcar, VI Seminário Internacional de Geração Distribuída, INEE/WADE, 2.003.

**Panorama** do Setor Elétrico no Brasil, Centro da Memória da Eletricidade, 1.988.

**Petroleum Industry**, 2.007, em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum\\_industry](http://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum_industry)

**Philibert**, C., La Terre brûle-t-elle ?, Calmann-Levy, 1990, p. 53.

**Pimentel**, P. - Afinal, quem descobriu o petróleo do Brasil? - Das tentativas de Allport no século passado às convicções científicas de Ignácio Bastos, Rio de Janeiro, 1984.



**Platão**, *Laws*, V, 739, 740 e 741/Tradução inglesa de B. Jowett, 1.892, Dover, 2.006, pp. 99 - 101.

**Platão**, *Críticas*, 110 e; 111 a e b, Tradução brasileira de C. A. Nunes, Editora da UFPA, 2.001, pp. 160 - 161.

**PNUD**, 2.008, Relatório de Desenvolvimento Humano, compilado com base em dados de 2006.

**Polimeni**, J.M.; Polimeni, R.I., 2.006, Jevon's Paradox and the Myth of Technological Liberation, *Eological Complexity*, 3, 2.006, p. 345.

**Pollan**, M., 2006., *The Omnivore's Dilemma*, New York, Penguin Press HC p. 208-225.

**Ponce**, R., Agrup. Industrias de Base Florestal do IPT, 2.006 e 2007 (Comunicação pessoal).

**Ramos**, F., 1982, *A Crise do Setor Elétrico e a Política de Exportação de Metais Básicos (Mimeo)*

**Relatório** ETN nº BN/3/0256/040001, revisão 3ª, de 2.007, da Eletronuclear.

**Regalbutto**, J.R., Cellulosic Biofuels – Got Gasoline?, *Science*, Vol. 325. no. 5942, 14 August 2009, pp. 822 – 824.

**Rezende**, I., Engenheiro Ignácio Rezende, da COPELMI Mineração Ltda. – março de 2.008, comunicação pessoal.

**Roegen**, Georgescu, N., Verso un'altra economia ecologicamente e socialmente sostenibile, Bollati Boringhieri ed., 2003, p. 78 – 94.

**Roméro**, M.A, Eficiência energética e arquitetura: dois conceitos inseparáveis, CLIMATIZAÇÃO, fevereiro, 2001.

**Rosa**, Eugene *et all*, *Energy and Society - Annual Review of Sociology*, nº 14, 1988, p. 150 - 152.

**Rudolph**, R.; Ridley, S., *Power Struggle: The Hundred-Year War over Electricity*, Harpercollins, 1986, pp. 22 a 56.

**Ruelle**, D., *Chaotic Evolution and Strange Attractors*, Cambridge University Press, 1996, pp. pp. 69 - 71.

**Ruth**, M., Insights from Thermodynamics for the Analysis of Economic Processes, *in Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy*, Springer, 2.005, pp. 246 – 251.

**Rüther**, R. e Zilles, R., Eletricidade solar para os tetos do Brasil, *in Valor Econômico*, 20 de outubro de 2.008.

**Rüther**, R., *in O Estado de São Paulo*, 25 de janeiro de 2009.

**Schäffer**, R, 2009, Comunicação pessoal.

**Schobert**, H. H., *Energy and Society*, Taylor&Francis, 2.001, pp. 531 - 544.

**Schrödinger**, E., 1.967, *What is Life?*, Cambridge University Press, p. 75 – 91.

**The American Science Foundation**, *et al*, *Breaking the Chemical and Engineering Barriers to Lignocellulosic Biofuels*, 2007.

**Ummels**, B.C., Pelgrum, E. and Kling, W.L. Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply. *IET Renewable Power Generation*, 2 (1), 2008.

**Unger**, T., Indústria Alcoolquímica, Trabalho apresentado em 1.968 pelo representante da Rohdia, Eng. Thomas Unger, ao Grupo Executivo da Indústria Química – GEIQUIM, do Ministério da Indústria e Comércio.

**UNICA** – União da Indústria da Cana-de-Açúcar, 2008, *A Importância do etanol e da co-geração na atual matriz energética brasileira e os principais desafios*. Brasília.

**United Nations**, *The World at Six Billion - World Population From Year 0 to Stabilization*, 1999.

**US Department of Energy** e US Department of Agriculture, 2005: *Biomass as Feedstock for Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply*, disponível em: <http://www.osti.gov/bridge>

**Urquiaga**, S.; Rodrigues Alves, B.; Boodey, R.M., *Produção de biocombustíveis. A questão do balanço energético - Política Agrícola*, Jan./Fev./Mar. 2005.

**van der Voet**, E., *et ali*, *Policy Review on Decoupling*, Universitair Grafisch Bedrijf, Leiden, 2005, p. 17 - 20

**Veiga**, J. E., *Desenvolvimento Sustentável - O Desafio do Século XXII*, Garamond, 2005

**Veiga**, J.E., *Territórios para um desenvolvimento sustentável*, Ciência e Cultura, jan./mar. 2006, p. 123.

**Véron**, J., *L'Urbanisation du Monde*, Éditions La Découverte, 2006, p. 72 – 73.

**Xavier**, AC; Vettorazzi, CA., Leaf Area Index of ground covers in a subtropical watershed, p. 427, *Scientia Agricola*, v. 60 n° 3, jul/sept, 2.003, p. 427.

**van der Voet**, E., *et al*, *Policy Review on Decoupling*, Universitair Grafisch Bedrijf, Leiden, pp. 17 – 20, 2005.

**WCED**, 1987, *Our Common Future*, Oxford University Press, 1987.

**Weinberg**, S: *Os Três Primeiros Minutos*, Editora Guanabara Dois, 1980 pp. 123 e 129.