

Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento

Ennio Peres da Silva

João Carlos Camargo

Alexandre Sordi

Ana Maria Resende Santos

Introdução

Energia é um insumo essencial para os seres vivos. Seus metabolismos dependem de seu fornecimento regular, obtido através da ingestão de matéria orgânica formada principalmente de cadeias moleculares de carbono e hidrogênio.

Pode-se dizer que a necessidade mais básica dos seres vivos é a busca de energia para manter seus corpos em funcionamento. Esse aspecto, o atendimento da necessidade fisiológica, predominou na história do homem até ele descobrir que poderia controlar formas de energia que lhe seriam úteis como o fogo, que representou um marco do domínio do homem sobre as forças naturais, e o uso da energia térmica para cozinhar e aquecer-se.

Em seguida, a domesticação dos animais propiciou ao homem a energia mecânica para o transporte, a agricultura, etc. Há alguns milênios, a energia hidráulica dos rios e a eólica passaram a ser utilizadas. No entanto, somente com o advento da produção capitalista, há apenas três séculos, é que a energia assumiu conotação diferente e fundamental na substituição de homens e animais pelas máquinas.

Desde o domínio do fogo há 750.000 anos até o advento da revolução industrial não houve grande evolução na forma do homem utilizar a energia. Porém, com o vertiginoso processo de industrialização, a necessidade de energia aumentou e novas fontes primárias, com maior densidade energética, foram introduzidas. Desse modo, a introdução do carvão mineral marcou o fim da era da energia renovável representada pela madeira e os parques aproveitamentos hidráulicos e eólicos, para iniciar-se a era não renovável da energia, a era dos combustíveis fósseis.

A descoberta de um vetor energético como a eletricidade e a invenção das máquinas elétricas no século XIX, juntamente com a introdução dos veículos automotores, lançaram

as bases para a introdução da moderna sociedade de consumo, caracterizada por uma intensidade energética nunca vista na história da humanidade.

Dessa forma, foram necessários novos combustíveis de maior poder energético, sendo o petróleo, o “ouro negro”, o candidato que reuniu essas propriedades. Iniciou-se, assim, uma nova fase da utilização dos combustíveis para extração de energia, que pode ser chamada de “fase líquida”, que perdura até os dias de hoje. Mais recentemente, após a Segunda Guerra Mundial, a energia nuclear parecia uma alternativa promissora para a geração de energia elétrica, mas sofreu um grande revés por conta do acidente nuclear em Chernobyl em 1986 na Ucrânia.

O impacto da geração de energia

De uma forma ou de outra, todas as atividades humanas sobre a Terra provocam alterações no meio ambiente em que vivemos. Muitos destes impactos ambientais são provenientes da geração, manuseio e uso da energia. A principal razão para esta expressiva participação dos processos energéticos pode ser observada no fato de que em 1998, segundo as Nações Unidas¹, o consumo mundial de energia primária proveniente de fontes não renováveis (petróleo, carvão, gás natural e nuclear) correspondeu a aproximadamente 86% do total, cabendo apenas 14% às fontes renováveis. Além disto, de acordo com a Agência Internacional de Energia², do total de energia consumido em 1999 cerca de 53% ocorreu nos 24 países denominados pelas Nações Unidas como de economias desenvolvidas, ficando os cerca de 100 demais países, denominados de economias em transição ou países em desenvolvimento, com os 47% restantes.

Esta enorme dependência de fontes não renováveis de energia tem acarretado, além da preocupação permanente com o esgotamento destas fontes, a emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, que em 1996 foi da ordem de 23 bilhões de toneladas³, aproximadamente o dobro da quantidade emitida em 1965 (a taxa média de crescimento desta emissão verificada na década de 90 foi de 0,5% ao ano). Como consequência, o teor de dióxido de carbono na atmosfera tem aumentado progressivamente (Figuras 1 e 2), levando muitos especialistas a acreditarem que o aumento da temperatura

¹ World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability. UNDP, UN, 2000.

² <http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/tablee1.html>.

³ Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial 2000/2001. Banco Mundial, 2001, págs. 302/303.

média da biosfera terrestre, que vem sendo observado há algumas décadas, seja devido a um “Efeito Estufa” provocado por este acréscimo de CO₂ e de outros gases na atmosfera, já denominados genericamente “gases de efeito estufa”, conhecidos mundialmente pela sigla GHG (*Greenhouse Gases*).

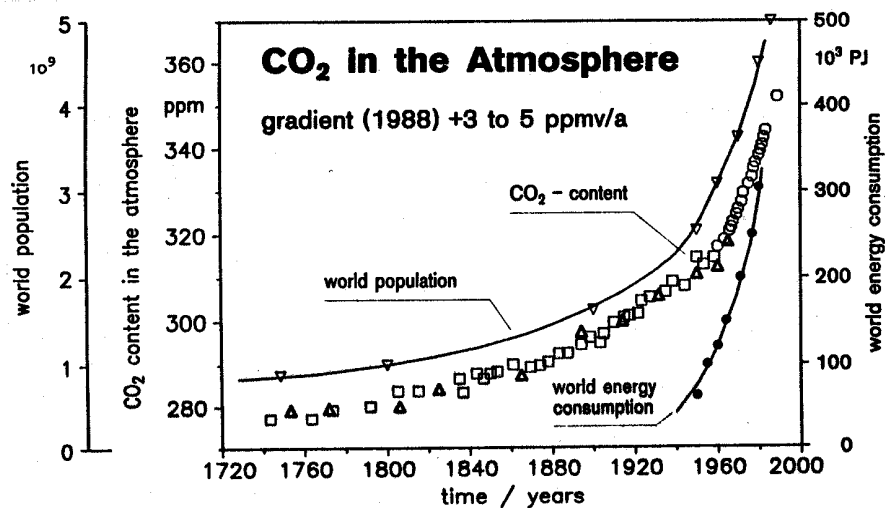


Figura 1- Evolução do teor de gás carbônico na atmosfera⁴

⁴C.-J. Winter. Hydrogen and Solar Energy – ULTIMA Ratio Avoiding a “Lost Moment in the History of Energy”!, Proc. VIII World Hydrogen Energy Conference, V. 1, p. 3-47, 1990.

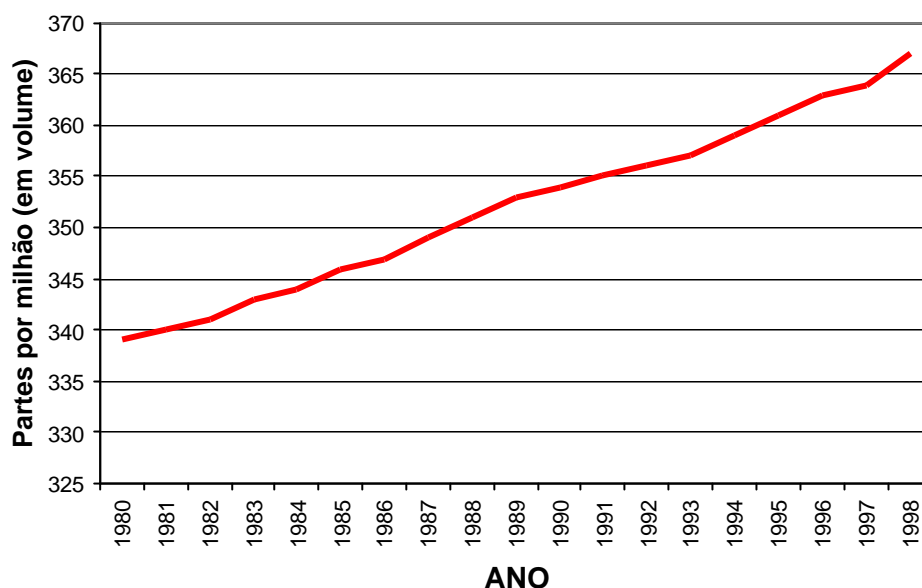


Figura 2- Evolução do teor de gás carbônico na atmosfera entre 1980 e 1998⁵

Se por um lado não há ainda entre os especialistas um consenso sobre a real existência deste “Efeito Estufa”, por outro a preocupação com este crescimento do teor de GHG na atmosfera começa a fazer parte de discussões internacionais (Rio-92, Kioto-97 e Bonn-2001), a ponto de inúmeros países, notadamente aqueles que mais contribuem com as emissões destes gases, já se comprometerem com algum tipo de controle destas emissões, mesmo que até o momento estes compromissos tenham ficado mais ao nível da retórica do que terem provocado ações efetivas dos governos neste sentido.

Os estudos realizados em escala global para reduzir-se a taxa de crescimento dos teores de GHG na atmosfera têm apontado para uma série de procedimentos de curto, médio e longo prazo, que vão desde a substituição de combustíveis fósseis (muitos países estão implementando a estratégia de substituir o uso de carvão e/ou derivados de petróleo pelo gás natural, procurando reduzir também a emissão dos demais poluentes associados a estes energéticos), passando pela introdução de medidas que tornam mais eficiente o uso da energia e pela criação progressiva de medidas legislativas de contenção de emissões nas grandes cidades (como a da Califórnia, USA⁶), até investimentos pesados no

⁵ The World Development Indicators 2001. World Bank, 2001.

⁶ J.T. Woestman e E.M. Logothetis, Controlling Automotive Emissions. The Industrial Physicist, 1995.

desenvolvimento das fontes renováveis de energia (como a energia eólica e a solar) e na produção de combustíveis denominados "limpos" (como aqueles derivados da biomassa e o hidrogênio), com baixa emissão de poluentes e/ou nenhuma liberação de CO₂.

Deve-se observar que a redução (ou diminuição do crescimento) dos impactos ambientais causados pelo uso intensivo das fontes não renováveis de energia, não se considerando qualquer perda na qualidade de vida alcançada com sua utilização, pode ser obtida através de ações do lado do consumo, pelo uso mais eficiente desta energia, e do lado da oferta, pelo aumento percentual da participação das fontes renováveis de energia. Evidentemente que os melhores resultados advirão da implementação simultânea destas duas abordagens.

Do ponto de vista do incremento do uso das fontes renováveis de energia, as medidas que possibilitarão uma participação mais significativa destas fontes no consumo mundial dizem respeito à otimização e melhor aproveitamento das fontes tradicionais, como hidráulica (aproveitamento de pequenas centrais, uso da energia hidroelétrica secundária, fora do pico, redução das perdas de transmissão, etc.) e de biomassa (uso de resíduos agrícolas, aproveitamento de lixo e esgoto, etc.), bem como ao aumento da competitividade das fontes alternativas de energia, como a solar e a eólica, com tecnologias já consolidadas, e outras como das ondas e do aproveitamento do gradiente térmico dos oceanos (OTEC), que ainda necessitam de investimentos em pesquisa. É fácil perceber que o incremento do uso das fontes renováveis trará não apenas os benefícios ambientais mencionados, mas também uma diversificação no uso das fontes de energia, reduzindo-se os riscos de descontinuidade de abastecimento, obtendo-se ainda maior competitividade e preços mais equilibrados.

Deve-se observar também que, de todas estas fontes renováveis citadas, apenas a biomassa permite a obtenção direta de combustíveis, enquanto as demais fornecem como primeiro produto a eletricidade. Se por um lado este fato não tem grande relevância para a geração estacionária de energia, praticamente todo o setor de transportes depende do suprimento de combustíveis; isto reduz significativamente as alternativas de fontes renováveis disponíveis.

No caso específico deste setor, sua participação no consumo mundial de energia situa-se em torno de 20%, correspondendo também a algo desta ordem sua participação no

total das emissões globais de CO₂. No Brasil, o setor de transportes apresenta semelhança com a participação no total do consumo (20,6% da energia total em 1999, segundo o Balanço Energético Nacional 2000⁷), porém, em vista deste setor ser o responsável pelo uso de mais da metade dos combustíveis derivados do petróleo, cuja participação no total de emissões de CO₂ do país é da ordem de 80%⁸, conclui-se que o setor de transporte contribui com algo da ordem de 40% das emissões totais brasileiras.

Outra característica importante do setor de transportes é que, além de ser um dos principais emissores de GHG, a concentração de veículos nas grandes cidades faz com que localmente os impactos ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis sejam muito mais significativos, pela concentração de poluentes praticamente no perímetro urbano dos municípios ou, pior ainda, em algumas áreas mais restritas, como as regiões centrais das cidades onde, além disso, em geral existe pouca circulação do ar pela presença de grande número de prédios e edifícios. De fato, o uso de combustíveis para transporte no meio urbano tem sido o principal fator de comprometimento da qualidade do ar das grandes cidades, em que pese o fato de nas duas últimas décadas ter havido reduções significativas na emissão de poluentes como monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) provenientes da queima de derivados de petróleo em motores de veículos. No caso do dióxido de carbono (CO₂), ao contrário dos demais, as emissões permaneceram com índices crescentes, uma vez que as eficiências dos veículos não experimentaram avanço equivalente.

Pequenas partículas suspensas são uma mistura de partículas de combustão primária e produtos da conversão secundária como os aerossóis, sulfatos e nitratos. Em muitas partes do mundo a poeira urbana levada pelo vento pode ser também significativa colaboradora para as partículas suspensas. Essas partículas são depositadas profundamente nos pulmões, onde sua remoção é lenta e sua capacidade de causar dano é reforçada. Elas também carregam traços de metais adsorvidos e hidrocarbonetos cancerígenos para o interior dos pulmões, intensificando o potencial de danos à saúde. Estudos dos efeitos à saúde humana

⁷ Balanço Energético Nacional 2000. DNDE/SEM/MME, 2000.

⁸ Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. MCT, http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/invent1.htm.

causados pela poluição aérea têm se concentrado nas pequenas partículas. Além disso, há poucas medições dessas partículas na maioria das cidades, sendo considerada a determinação da quantidade de partículas menores que 10 microgramas (PM₁₀) um melhor indicador que os níveis totais simples de partículas.

No final da década de 90 as concentrações médias anuais de PM₁₀ nas cidades da América do Norte, Europa Ocidental e do Japão situaram-se entre 30 a 45 microgramas por metro cúbico. A norma americana, por exemplo, permite até 50 microgramas por metro cúbico. As emissões brasileiras situam-se em torno de 70 microgramas por metro cúbico⁹.

Há ainda os problemas relacionados aos níveis de dióxido de nitrogênio e do ozônio que excedem as normas em muitas cidades, particularmente aquelas com abundância de radiação solar como Los Angeles (EUA) e Atenas (Grécia). Evidências recentes sugerem que pequenas partículas (menores que 2,5 microgramas) podem ser melhores indicadores de doenças, o que levou os Estados Unidos a formular regulação sobre essas emissões.

Este enfoque sobre emissões de partículas cada vez menores tem trazido ao material particulado do Diesel uma atenção crescente. Diferente da gasolina, o Diesel produz uma significativa quantidade de emissões de partículas que não são apenas menores, mas podem conter propriedades químicas que as tornam mais perigosas. Isso faz crescer o questionamento sobre o futuro dos veículos a ciclo Diesel, mesmo que esses veículos sejam ligeiramente mais eficientes e de custo mais baixo que os a gasolina.

Desde a década de 80 estudos revelaram que não há um limiar no qual a concentração de partículas abaixo desse limite não ocasionaria danos à saúde. Identificou-se apenas que os efeitos danosos ao homem dão-se na razão direta da concentração dessas partículas, ou seja, para concentrações menores, menores danos e vice-versa.

Até o início da década de 90, a principal fonte de emissões de chumbo por todo o planeta era o chumbo tetraetila, usado como aditivo para aumentar a octanagem da gasolina. Mas quase todos os países têm agora planos de removê-lo da gasolina. Um significativo número de crianças em muitos países industrializados e em desenvolvimento tem altos níveis de chumbo no sangue, o que pode levar ao atraso do desenvolvimento cognitivo (inteligência).

⁹ World Energy Assessment. *Energy and the challenge of sustainability*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council. Edited by José Goldemberg, 2000.

As cidades dos países em desenvolvimento têm concentrações médias de poluentes muito maiores que as cidades dos países industrializados. Em cidades da China e da Índia, as médias parecem estar próximas de 200 microgramas por metro cúbico de PM₁₀, embora haja muita variação de acordo com a estação do ano e da cidade. Tais concentrações devem estar causando mortes prematuras significantes – talvez 15% ou mais acima dos níveis anteriores.

A Tabela 1 apresenta as estimativas recentes dos impactos para a saúde da geração de energia elétrica com carvão e gás natural equipadas com a melhor tecnologia de controle disponível. Para os ciclos combinados a gás natural, os únicos custos significantes à saúde são aqueles relacionados com as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e estes custos são relativamente baixos (tipicamente cerca de 5% do custo de geração). Mas para o carvão o custo estimado para a saúde (principalmente devido ao dano causado pelos particulados) é elevado e comparável ao custo de geração.

Tabela 1: Emissões de poluentes aéreos e estimativa dos custos à saúde para usinas termoeletricas equipadas com as melhores tecnologias de controle disponíveis

Local	Custo unitário de saúde (c/g)			Taxa de emissão (g/kWh)				Custo unitário de saúde (c/kWh)				
				Carvão pulverizado/Vapor -Energia elétrica			Ciclo combinado/GN	Carvão pulverizado/Vapor – Energia elétrica			Ciclo combinado/GN	
	SO _x	NO _x	MP ₁₀	SO _x	NO _x	MP ₁₀	NO _x	SO _x	NO _x	MP ₁₀	Total	NO _x
Típico	1,0	1,6	1,7	1,0	2,0	0,2	0,1 ^a	1,0	3,2	0,3	4,5	0,16
Urbano	1,6	2,3	5,1	1,0	2,0	0,2	0,1 ^a	1,6	4,6	0,5	6,7	0,23
Rural	0,7	1,1	0,5	1,0	2,0	0,2	0,1 ^a	0,7	2,2	0,1	3,0	0,11

Nota: Estes cálculos foram realizados como parte do Programa Externo da Comissão Européia. Os estudos estimaram os valores econômicos dos impactos à saúde estimando a magnitude da disposição a pagar das pessoas para evitar os efeitos

adversos à saúde. Os custos estimados à saúde mostrados são os valores médios; o intervalo de confiança 68% está entre 0,25 e 4 vezes o custo médio¹⁰.

Por tudo isto é que grandes cidades como Los Angeles, Cidade do México, Tóquio, São Paulo e outras vêm adotando e estudando a implantação de diversas medidas buscando controlar este problema, que vão desde alterações técnicas redutoras das emissões veiculares, tais como o uso de aditivos especiais à gasolina, uso de catalisadores, incremento na utilização do gás natural, até medidas de restrição ao tráfego de veículos em determinadas áreas em certas épocas do ano, como o denominado "rodízio" de veículos já implementado na cidade de São Paulo desde 1995, pedágio eletrônico em determinados locais da cidade, controle rigoroso do nível de emissão dos motores da frota com pesadas multas para veículos fora de especificação e imposto adicional proporcional ao nível de emissão do veículo, as três últimas ainda em estudo.

Além destas medidas, têm surgido algumas propostas mais radicais, como ocorreu na cidade de Los Angeles, onde o CARB (*California Air Resources Board*) determinou aos fabricantes de veículos automotivos que participam daquele mercado a obrigatoriedade de introduzirem, a partir de 2003, um número crescente de veículos com características de emissão zero (*ZEV – Zero Emission Vehicles*), como mostrado na Figura 3.

¹⁰ World Energy Assessment. *Energy and the challenge of sustainability*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council. Edited by José Goldemberg, 2000.

FFEV* + City Scenarios

*full function electric vehicles

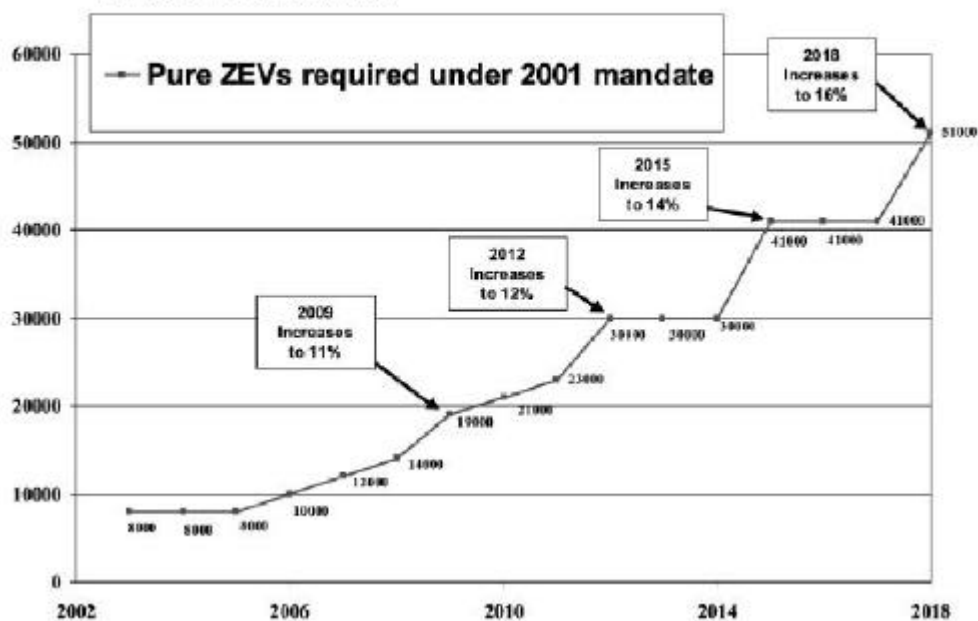


Figura 3- Programa de introdução de veículos ZEV no mercado da Califórnia, E.U.A.¹¹

Atualmente apenas carros elétricos satisfazem esta condição de emissão zero (emissão zero no que diz respeito ao sistema de propulsão), havendo como únicas alternativas o uso de baterias eletroquímicas ou células a combustível. No primeiro caso os veículos a baterias já são conhecidos há muito tempo, e sua tecnologia tem sido bastante estudada, havendo modelos comerciais operando em várias partes do mundo. Entretanto alguns problemas técnicos como o tempo de recarga das baterias e sua viabilidade econômica persistem. No segundo caso, ao contrário, a tecnologia das células a combustível é bastante recente, ainda com um grande potencial de aperfeiçoamento, onde o uso do hidrogênio como um combustível "limpo" aparece como uma alternativa interessante, principalmente se produzido a partir de fontes renováveis de energia, não originando em todo seu ciclo de geração e utilização qualquer composto de carbono.

Perspectivas para novas tecnologias de geração e seus impactos ao meio ambiente

A sustentabilidade no suprimento de energia é o grande desafio que se coloca para o futuro da humanidade. Aliado a isso, outro desafio de tal envergadura é o atendimento da

¹¹ Zero Emission Vehicle Program Changes. California Air Resources Board, CA, USA, 2001.

população sem acesso a energia elétrica. É notável que aproximadamente 1,6 bilhões de pessoas ainda não têm acesso à energia elétrica ou outras formas de energia comercial e que os 20% mais pobres usem somente 5% do total de energia consumida no mundo. Globalmente, a demanda por energia está aumentando em sintonia com o desenvolvimento socioeconômico. Além disso, há grandes disparidades no nível de consumo, não só entre diferentes países, mas também entre ricos e pobres no mesmo país.

Segundo as conclusões do World Energy Outlook, a demanda primária de energia mundial e as emissões de carbono crescerão respectivamente 65% e 70% entre 1995 e 2020 e os combustíveis fósseis responderão por mais de 90% da demanda primária de energia em 2020¹².

Os danos ambientais das fontes não renováveis já são bem conhecidos e grandes esforços no mundo têm sido feitos para a paulatina introdução das energias renováveis no cenário energético vindouro, conforme já mencionado. Países como Alemanha já lançaram programas ambiciosos de substituição da geração de energia elétrica com usinas nucleares por fontes renováveis de energia, como a eólica.

Quanto ao efeito estufa, várias conferências têm sido realizadas para atingir um acordo entre os países que possuem as maiores cotas de emissão dos gases de efeito estufa. O protocolo de Kyoto estabeleceu em 1997 limites para a emissão de gases de efeito estufa para os países signatários do acordo. Para atingir os objetivos do acordo, os países pertencentes à Agência Internacional de Energia (IEA) chegaram a quatro alternativas:

- Menor uso dos serviços de energia com aquecimento, iluminação, transporte, motores e secagem industrial;
- Diminuir a quantidade de energia necessária para produzir uma unidade de serviço de energia, através do desenvolvimento e uso de sistemas, tecnologias de uso final e suprimento energético mais eficientes;
- Mudança dos combustíveis fósseis para os combustíveis não-fósseis e dos hidrocarbonetos de molécula maior para os hidrocarbonetos de molécula menor;
- Remover o carbono dos gases de saída da combustão e armazená-lo.

¹² World Energy Outlook. *Looking at Energy subsidies: Getting the Prices Right*. Mídia eletrônica: www.iea.org, 25/01/2002, às 11:45hs.

A segunda opção implica no desenvolvimento de novas tecnologias de conversão energética que sejam mais eficientes, ou seja, que consigam retirar mais energia das fontes primárias, e que possuam menor impacto ambiental. Por isso, o desenvolvimento de novas tecnologias de conversão e os melhoramentos nas atualmente utilizadas são os objetivos principais do empenho de governos, indústrias e da sociedade em geral para atingir a sustentabilidade.

A energia nuclear

Atualmente a energia nuclear responde por 6% da energia e 16% da produção elétrica produzida no mundo. A maioria dos analistas projeta que a contribuição da energia nuclear para a energia global não crescerá e provavelmente declinará no futuro próximo. As causas apontadas são os custos maiores que o originalmente esperado, o aumento da competição das tecnologias alternativas e a perda da confiança do público devido às preocupações em torno da segurança, manejo do lixo radiativo e proliferação de armas nucleares.

Já que a energia nuclear pode fornecer eletricidade sem emitir poluentes aéreos e gases de efeito estufa, há um empenho de seus defensores em demonstrar novas alternativas tecnológicas de reatores mais seguros e de menor custo. Diferentemente dos reatores de Chernobyl, os reatores de água leve (LWR) empregados na maioria das instalações no mundo não têm tido grandes problemas de segurança, apesar da recorrente ocorrência de pequenos incidentes. No entanto, permanecem as dúvidas sobre a proliferação de armas nucleares.

Novas perspectivas para o aproveitamento dos combustíveis fósseis

O carvão ainda é a fonte de energia mais utilizada para geração de energia elétrica e suas reservas mostram que não há uma previsão de esgotamento pelo menos nos próximos dois séculos. No entanto, conforme mostrado anteriormente, é uma das mais poluentes fontes primárias. Por isso, as estratégias de curto prazo estão voltadas para o desenvolvimento de combustíveis sintéticos e novas tecnologias de geração. As novas tecnologias incluem a cogeração (geração de calor e energia elétrica combinados) e

poligeração, que abrange a produção simultânea de combustíveis sintéticos, eletricidade, calor de processo e produtos químicos.

Podemos identificar claramente, no futuro próximo, uma opção energética pelo gás natural, um combustível bem menos poluente que o carvão e o petróleo, sendo que as turbinas a gás com ciclo combinado representam a geração termoelétrica mais eficiente.

As tecnologias avançadas mais promissoras de cogeração e geração termoelétrica para o curto (5 anos) e médio (10 anos) prazos incluem as tecnologias baseadas em turbinas a gás, ciclo combinado a carvão com gaseificador integrado (IGCC) e ciclo combinado a gás natural (NGCC). As novas tecnologias já comercialmente disponíveis de turbinas a gás permitem eficiência de até 54% na conversão. As tecnologias IGCC, em torno de 40% (Tabela 2).

Para um horizonte um pouco maior, grandes esperanças estão sendo depositadas nas fontes renováveis de energia, principalmente a energia eólica e a solar. Ambas apresentam um significativo crescimento nos últimos anos (Tabela 3). A energia eólica já atingiu maturidade suficiente em alguns países, colocando-a em condições competitivas com as fontes tradicionais não renováveis.

Tabela 2 - Desempenho das novas tecnologias para uso de carvão e de GN

Desempenho, custos e taxas de emissão	Planta de geração vapor-eletricidade a carvão pulverizado com dessulfurização dos gases de saída	Ciclo combinado a carvão com gaseificador integrado		Planta de ciclo combinado a gás natural (NGCC)	
		Turbina refrigerada a ar	Turbina refrigerada a vapor	Turbina refrigerada a ar	Turbina refrigerada a vapor
Capacidade da planta (MW)	500	500	400	506	400
Eficiência (% com base no poder calorífico superior)	35,5	40,1	43,8	50,2	54,1
Custo capital instalado (US\$/kW)	1090	1320	1091	468	445
Taxa de emissão CO ₂ (gCO ₂ /kWh)	238	210	193	98	91

Custo de geração total (US\$/MWh)					
Preço do combustível típico EUA	32,3	35,5	31,2	30,9	29,1
Preço do combustível típico Europa	39,4	41,8	37	34,4	32,4

Fonte: WEA, 2000

A economia do hidrogênio

Nota-se claramente a evolução dos combustíveis na história humana. Por um grande período, da aurora das civilizações até a era industrial, predominou a fase sólida com a madeira e, posteriormente, o carvão. Há pouco mais de um século, o aproveitamento do petróleo inaugurou a fase líquida já referida anteriormente. Atualmente nota-se um empenho pela utilização do gás natural e futuramente o hidrogênio. Com isso, delinea-se no horizonte energético a “fase gasosa”. Essa evolução na utilização dos combustíveis é citada por muitos autores como a descarbonização da economia, pois os combustíveis utilizados têm cadeias carbônicas cada vez menores (Figura 4). Este é um fato importante que tem sido percebido nos últimos duzentos anos através de pesquisas, ou seja, que o mundo tem perseguido uma progressiva descarbonização da matriz energética. Seguindo essa tendência, a economia baseada no hidrogênio como fonte energética representaria o fim da era do carbono como fonte de energia.

Tabela 3 - Estado atual e custos potenciais futuros das tecnologias de energias renováveis.

Tecnologia	Aumento na capacidade instalada nos últimos 5 anos (% p/ ano)	Capacidade de operação, fim de 1998	Fator de capacidade (%)	Produção de energia, 1998	Custo de investimento "turn-key" (dólares/kW)	Custo atual da energia (centavos de dólar/kWh)	Custo potencial futuro da energia
Energia Biomassa							
Eletricidade	≈ 3	40 GWe	5 – 80	160 TWh (e)	900 – 3000	5 – 15 c/kWh	4 – 10 c/kWh
Calor ^l	≈ 3	> 200 GWth	25 – 80	> 700 TWh (th)	250 – 750	1 – 5 c/kWh	1 – 5 c/kWh
Etanol	≈ 3	18 bilhões litros				8 – 25 \$/GJ	6 – 10 \$/GJ
Energia eólica	≈ 30	10 GWe	20 – 30	18 TWh (e)	1100 – 1700	5 – 13 c/kWh	3 – 10 c/kWh
Eletricidade fotovoltaica	≈ 30	500 MWe	8 – 20	0,5 TWh (e)	5000 – 10000	25 – 125 c/kWh	5 ou 6 – 25 c/kWh
Eletricidade solar térmica	≈ 5	400 MWe	20 – 35	1 TWh (e)	3000 – 4000	12 – 18 c/kWh	4 – 10 c/kWh
Aquecimento solar – baixa temperatura	≈ 8	18 GWth (30 milhões m ²)	8 – 20	14 TWh (th)	500 – 1700	3 – 20 c/kWh	2 ou 3 – 10 c/kWh
Hidroeletricidade							
Grande	≈ 2	640 GWe	35 – 60	2510 TWh (e)	1000 – 3500	2 – 8 c/kWh	2 – 8 c/kWh
Pequena	≈ 3	23 GWe	20 – 70	90 TWh (e)	1200 – 3000	4 – 10 c/kWh	3 – 10 c/kWh
Energia geotérmica							
Eletricidade	≈ 4	8 GWe	45 – 90	46 TWh (e)	800 – 3000	2 – 10 c/kWh	1 ou 2 – 8 c/kWh
Calor	≈ 6	11 GWth	20 – 70	40 TWh (e)	200 – 2000	0,5 – 5 c/kWh	0,5 – 5

Energia marítima							
Maré	0	300 MWe	20 – 30	0,6 TWh (e)	1700 – 2500	8 – 15 c/kWh	8 – 15 c/kWh
Ondas	–	fase exp.	20 – 35	incerto	1500 – 3000	8 – 20 c/kWh	incerto
Correntes	–	fase exp.	25 – 35	incerto	2000 – 3000	8 – 15 c/kWh	5 – 7 c/kWh
OTEC	–	fase exp.	70 – 80	incerto	incerto	incerto	incerto

Nota: O custo da eletricidade suprida pela rede em áreas urbanas situa-se entre 2 a 3 c/kWh (fora de ponta) a 15 a 25 c/kWh (ponta)

1. Calor contido no vapor (ou água quente), freqüentemente produzido pela combinação de calor e eletricidade usando resíduos florestais, licor negro ou bagaço.

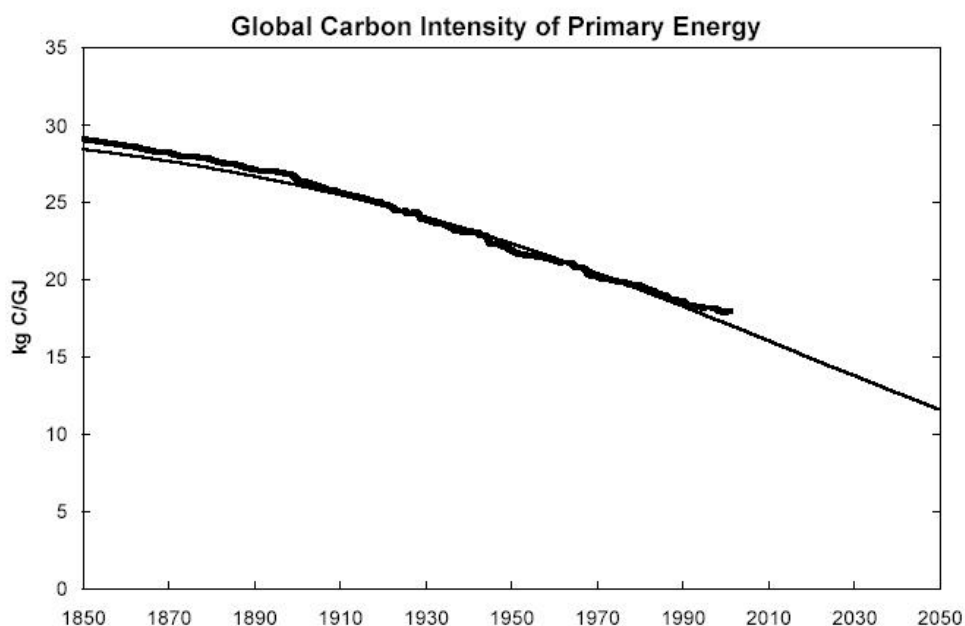


Figura 4 – Descarbonização ou mudança da intensidade do carbono da energia primária para o mundo. A intensidade de carbono é calculada como a relação da soma do conteúdo carbonífero pela soma do conteúdo energético de todas as fontes de energia primária¹³

Há um consenso na comunidade mundial de que a era do petróleo barato está terminando. Os poços de petróleo que estão sendo descobertos fazem parte de bacias *off-shore* com custos crescentes de extração. As grandes bacias petrolíferas se encontram em países do Oriente Médio, onde a instabilidade política não garante a tranquilidade almejada pelo Ocidente. Além disso, as questões ambientais associadas à utilização dos combustíveis fósseis descritas anteriormente são motivos de preocupação da comunidade internacional. Esses fatores implicarão inevitavelmente em custos crescentes para a sociedade, cuja economia está baseada no petróleo.

Após a Crise do Petróleo em 1973 e 1979 houve um esforço para se encontrar alternativas para a produção de energia no mundo. A ênfase foi dada na busca de novas fontes de energia e na melhoria dos processos de conversão para diminuir o consumo de petróleo. No entanto, a queda do preço do petróleo na década de 80 e 90 arrefeceu o empenho demonstrado após a crise de 1973. O orçamento nas pesquisas para alternativas para o petróleo diminuiu sensivelmente.

¹³ Ausubel, J. H. Decarbonization: the next 100 years. 50th Anniversary Symposium of the Geology Foundation Jackson School of Geosciences, U. of Texas Austin, Texas, 25 April 2003
URL: <http://phe.rockefeller.edu/AustinDecarbonization/>

Mas, apesar disso, foram lançadas sementes de novas tecnologias de conversão que agora começam a frutificar. Tecnologias como a solar fotovoltaica, geradores eólicos e células a combustível começam a penetrar no mercado. Os geradores eólicos já apresentam custos competitivos com as formas tradicionais de geração de energia elétrica. Nos últimos anos a capacidade eólica mundial cresceu num ritmo anual de 27,75%¹⁴. A *European Wind Association* prevê que a energia eólica possa produzir 10% da eletricidade mundial até 2020¹⁵. A indústria eólica é um dos segmentos de mercado com crescimento mais rápido na economia mundial. Atualmente há cerca de 15 GW de energia eólica instalada no mundo, dos quais 10 GW está na Europa. A Dinamarca já produz 14% de seu consumo de energia elétrica através do vento¹⁶.

Grandes esperanças estão depositadas também na tecnologia das células a combustível. Desenvolvidas a princípio para as naves tripuladas que foram ao espaço na década de 60, logo se viu vantagens que poderiam ser utilizadas na produção de energia elétrica na Terra.

A célula a combustível é um dispositivo eletroquímico que transforma energia química de um combustível diretamente em eletricidade. O hidrogênio, em combinação com o oxigênio do ar, resulta em energia elétrica, calor e água, num processo de eletrólise reversa. Sua eficiência de transformação é superior aos dispositivos tradicionais, que utilizam a combustão como uma etapa térmica intermediária para retirar energia de um combustível fóssil. Seu grande apelo ambiental reside no fato de ela diminuir ou até mesmo não emitir os gases que são tradicionalmente liberados pelas máquinas térmicas tradicionais.

O combustível para as células é o hidrogênio. Atualmente a maior parte do hidrogênio obtido mundialmente provém das fontes fósseis. Através da reforma do gás natural são produzidos cerca de 48% do hidrogênio no mundo; o petróleo e o carvão são responsáveis por 30% e 18% da produção, respectivamente. A eletrólise é responsável por 4% dessa produção¹⁷. Mas o hidrogênio também pode ser produzido através das fontes renováveis, como solar, hidráulica, eólica e a biomassa. O diagrama da figura 6 ilustra simplificada os processos de obtenção do hidrogênio através das fontes renováveis.

Particularmente no caso da biomassa, essa opção é extremamente interessante para o Brasil, já que o país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. As duas formas de obtenção do hidrogênio dessa fonte são a reforma vapor do etanol e a gaseificação do bagaço.

¹⁴ Chambers. A. *Distributed Generation: A Nontechnical Guide*. Tulsa, OK: PennWell, 2001

¹⁵ Idem

¹⁶ Hoffmann P. *Tomorrow's Energy Hydrogen*. The MIT Press Cambridge, Massachusetts 02142. 289 p.

¹⁷ DOE (2002) U.S. Department of Energy, Hydrogen Information Network. <http://www.eren.doe.gov/hydrogen/faqs.html#cost>

A reforma é definida como a conversão catalítica e endotérmica de um combustível líquido, sólido ou gasoso disponível comercialmente para um gás combustível (H_2). A maioria dos processos utiliza hidrocarbonetos leves para a extração do hidrogênio. Os hidrocarbonetos leves são aqueles com cadeias carbônicas situadas entre o metano e a nafta, com pontos de ebulição inferiores a $250^\circ C$. Esses compostos podem reagir com a água a temperaturas entre 800 e $900^\circ C$ em presença de catalisadores, resultando numa mistura de gases contendo principalmente H_2 , CO , CO_2 e CH_4 ¹⁸. Essa reação resulta em um produto gasoso de composição típica aproximada de 62,6% de H_2 , 21,4% de CO_2 , 12,5% de H_2O e 3,5% de N_2 em volume¹⁹.

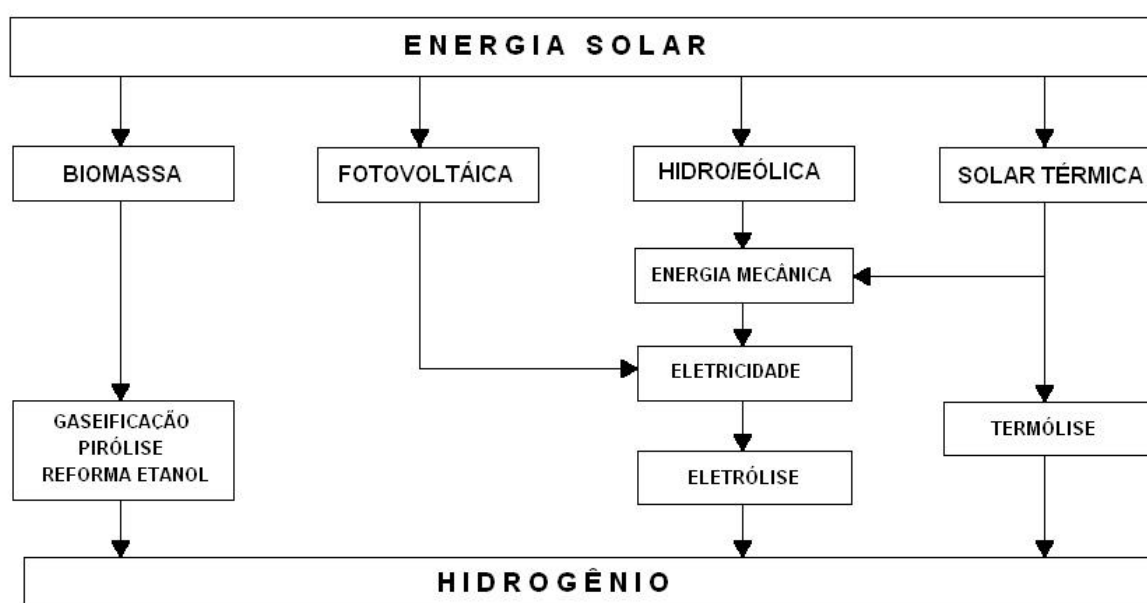


Figura 6: Diagrama simplificado da obtenção do hidrogênio através das fontes renováveis

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica realizado a altas temperaturas, envolvendo oxidação parcial dos elementos combustíveis de constituição da biomassa. Os gases produzidos na gaseificação são formados por CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio e várias outras substâncias - pequenas partículas de

¹⁸ Silva, E. P. Introdução a Tecnologia e Economia do Hidrogênio. Campinas: Editora da UNICAMP, 1991, 204p.

¹⁹ BROWN, L. F. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles. International Journal Hydrogen Energy. International Association for Hydrogen Energy. Elsevier Science Ltd. Vol. 26, p. 381-397, 2001.

coque, cinza, alcatrão e óleos, que são consideradas contaminantes. A composição desse gás de síntese depende do tipo de gaseificador e das características do gaseificador²⁰.

Mesmo utilizando hidrocarbonetos como combustíveis primários, as emissões de gases como dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre são menores ou inexistentes utilizando células a combustível do que as formas tradicionais de queima desses combustíveis para gerar eletricidade. Elas também produzem menor nível de ruído por ser uma forma estática de conversão de energia.

Algumas tecnologias já se encontram em fase comercial e outras ainda estão sendo desenvolvidas. Grandes empresas privadas e agências governamentais estão investindo nesta tecnologia. A grande desvantagem destes sistemas é seu custo atual que, entretanto, deverá ser significativamente reduzido com os avanços tecnológicos (só recentemente está-se investindo recursos expressivos nesta tecnologia) e com os ganhos de escala de produção.

Considerações finais sobre energia e desenvolvimento

O tema energia tem um significado importante no debate da questão ambiental e do desenvolvimento sustentável. Isto porque para o desenvolvimento econômico a energia é um dos insumos básicos. Ela não é apenas um componente da infra-estrutura industrial de um país, mas é também de outros setores como, por exemplo, o setor de transportes, telecomunicações, comércio e educação. Por outro lado, no que diz respeito à questão ambiental, vários desastres ecológicos e alterações no meio ambiente têm relação estreita com o suprimento de energia surgindo, portanto, várias críticas às teorias de desenvolvimento existentes.

O conceito de desenvolvimento até a década de 30, de acordo com Mota²¹, estava relacionado à produção de bens materiais, ou seja, evoluir significava produzir mais e o mercado tinha como função a distribuição destes produtos. Se, por um lado, este tipo de desenvolvimento levou a grandes transformações econômicas e políticas, com a revolta contra o reinado e a criação de instituições que substituíram o poder absoluto do rei, por outro lado trouxe conflitos e contradições, manifestados nas condições precárias de vida da maior parte da população.

²⁰ BAIN, Richard L., OVEREND, P. Ralph, CRAIG, R. Kevin. **Biomass-fired power generation**. Fuel Processing Technology, nº 54 pg 1-16. Elsevier Science B.V.1998.

²¹ MOTA, Carlos Renato. As principais teorias e práticas de desenvolvimento. In: Bursztyn, Marcel (org.). A difícil sustentabilidade. Política energética e conflitos ambientais. Rio de Janeiro: Garamond, p. 27-40, 2001.

Após a Segunda Guerra Mundial o conceito de desenvolvimento passa a estar relacionado ao bem-estar social, visto que este conceito passa a ser identificado com direitos sociais, segurança social e políticas redistributivas de renda, com ênfase na atuação do Estado, que passa a valorizar o planejamento em detrimento das forças de mercados auto-reguladas²². Neste ponto os conceitos sobre desenvolvimento – como bem-estar social e como progresso – se conciliaram a partir de uma coalizão de interesses entre o Estado, sociedade e mercado²³.

No Brasil, do final da Segunda Guerra Mundial até os anos de 1970, o desenvolvimento ocorreu a partir de uma estrutura de produção e distribuição que foi orientada principalmente para as classes de renda mais alta. Os setores mais dinâmicos nesta época eram a indústria automobilística e a indústria de bens de consumo durável, típicos das classes alta e média. Segundo Mota tratava-se de uma estrutura de produção, distribuição e consumo altamente concentrada, em que uma elite controlava e dominava os recursos disponíveis – terra, crédito, renda – e a maioria da população continuava sem receber os benefícios da expansão econômica e do progresso técnico. Tal estrutura continua existindo e é fonte de conflitos e críticas às teorias de desenvolvimento existentes²⁴.

Os valores que sustentam a noção de desenvolvimento ainda vigente dão exagerada ênfase ao crescimento²⁵ econômico, o que implica na exploração descontrolada de recursos naturais e consumo exagerado. Esses valores têm gerado uma série de novos riscos, problemas ecológicos, degradação ambiental, desintegração e desigualdade social, marginalização de regiões e indivíduos, violência etc²⁶.

²² “O Estado a partir de políticas fiscais e monetárias, cambiais, tecnológicas, científicas passa a ser um agente no financiamento, alocação e realocação de recursos públicos orientados para o desenvolvimento econômico” (Idem, 2001: 31-32).

²³ Idem.

²⁴ BARBOSA, Sônia Regina da Cal Seixas. Desenvolvimento e ambiente: questões fundamentais da sociologia contemporânea. Humanitas, Campinas, 3 (2): 39-53, ago/dez, 2000.

BARTHOLO Jr, Roberto. A mais moderna das esfinges: notas sobre ética e desenvolvimento. In: Bursztyn, Marcel (org.). A difícil sustentabilidade. Política energética e conflitos ambientais. Rio de Janeiro: Garamond, p. 13–26, 2001.

GUIMARÃES, Roberto. Agenda 21 e desenvolvimento sustentável. Debates socioambientais. Ano IV, n. 11 – nov/fev 1998/1999.

HERCULANO, Selene Carvalho. Do desenvolvimento (in) suportável à sociedade feliz. Goldenberg, Mirian (coord.). Ecologia, ciência e política. Rio de Janeiro: Revan, p. 9-48, 1992.

²⁵ “Quanto a definição de crescimento não há grandes controvérsias. Ele é caracterizado como uma elevação persistente do produto nacional bruto real, per capita, ao longo do tempo, traduzindo-se ainda, algumas vezes, como um aumento no nível do consumo per capita” (CAVALCANTI, 1996: 20). CAVALCANTI, Rachel Negrão. A mineração e o desenvolvimento sustentável: casos da Companhia Vale do Rio Doce. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996, 432 p. Tese (Doutorado).

²⁶ BARBOSA, Sônia Regina da Cal Seixas. Desenvolvimento e ambiente: questões fundamentais da sociologia contemporânea. Humanitas, Campinas, 3 (2): 39-53, ago/dez, 2000.

BROWN, L. et all. Estado do Mundo – 2000. Relatório de Worldwatch Institute sobre o avanço em direção a uma sociedade sustentável. Salvador: UMA Editora, 2000. p. 3 – 21.

Para se delinear uma nova estratégia de desenvolvimento é necessário ocorrer uma mudança na forma de pensar, perceber e definir valores, ou ainda, conforme Morin²⁷, é preciso “*repensar a reforma, reformar o pensamento*”. E, de fato, vive-se um processo de mudança de visão do mundo na ciência e na sociedade, uma mudança de paradigma tão radical como foi a revolução copernicana²⁸.

É nesse novo paradigma que deverá ser analisada a energia para o desenvolvimento sustentável. O uso e consumo da energia, bem como o planejamento energético, deverão ser reavaliados de forma a incorporar soluções sustentáveis.

Porém, essa compreensão ainda não atingiu sequer a maioria das universidades, corporações, instituições e menos ainda a sociedade, que deixam de reconhecer que os diferentes problemas estão inter-relacionados, como também que as possíveis soluções podem afetar as gerações futuras. A partir do ponto de vista sistêmico, as soluções viáveis são as soluções sustentáveis.

O conceito de sustentabilidade, nos termos do Relatório Bruntland, é definido como aquele que “*atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras também atenderem às suas*”²⁹.

Neste contexto, para que a questão energética se torne sustentável, é necessário que seus problemas sejam abordados de forma ampla, incluindo não apenas a gestão, o desenvolvimento e a adoção de inovações tecnológicas, mas também promovendo mudanças quanto ao comportamento da sociedade. De outra maneira, para que a mudança possa atender à reconciliação entre economia e meio ambiente é necessária uma mudança civilizacional³⁰ e, como coloca Sachs³¹, a solução requer uma passagem de uma “*civilização do ter*” para uma “*civilização do ser*”.

CARAPINHEIRO, Graça. A globalização do risco social. In: Santos, Boaventura de Souza (org.). A globalização das ciências sociais. São Paulo: Cortez, p. 197-230, 2002.

MARTINEZ-ALIER, José. Justiça social e distribuição ecológica de conflitos. In: Ferreira, Leila da Costa (org.). A sociologia no horizonte do século XXI. São Paulo: Bontempo, p. 122-135, 1997.

SANTOS, Boaventura de Souza. Os processos da globalização. In: Santos, Boaventura de Souza (org.). A Globalização e as Ciências Sociais. São Paulo: Cortez, p. 25-102, 2002.

²⁷ MORIN, Edgar. A cabeça bem-feita. Repensar a reforma, reformar o pensamento. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 9-33, 2000.

²⁸ CAPRA, Fritjof. O Ponto de Mutação. São Paulo: Editora Cultrix, 1982.

MORIN, Edgar. Introdução ao pensamento complexo. Instituto Piaget, 1990.

²⁹ HERCULANO, Selene Carvalho. Do desenvolvimento (in) suportável à sociedade feliz. Goldenberg, Mirian (coord.). Ecologia, ciência e política. Rio de Janeiro: Revan, p. 9-48, 1992.

³⁰ ROMEIRO, Ademar. Globalização e meio ambiente. Texto para Discussão. Campinas: UNICAMP/IE, n. 91, nov. 1999.

³¹ SACHS, Ignacy. Ecodesenvolvimento. Crescer sem Destruir. São Paulo: Editora Vértice, 1986.