

An aerial photograph of a large dam with multiple spillways. Water is cascading down the spillways, creating white foam. The dam is situated in a valley with green fields and some buildings in the background. The sky is clear and blue.

22

RECURSOS ENERGÉTICOS

Fabio Taioli

A energia é o grande “motor” do sistema Terra. Ao mesmo tempo, não há animal ou vegetal que subsista sem consumir alguma forma de energia. Os vegetais utilizam a energia proveniente do sol para efetuar a fotossíntese e assim fabricar seus constituintes. Os animais, por sua vez, alimentam-se de vegetais ou outros animais para obter a energia necessária e se manterem vivos.

Os seres humanos aprenderam ao longo dos séculos a utilizar diversas formas de energia que são encontradas na Terra, sendo este um fator de extrema importância no desenvolvimento da civilização, permitindo a fabricação de instrumentos e armas, além de proporcionar o cozimento de alimentos e aquecimento de ambientes. A habilidade de obter e utilizar energia tem permitido que a humanidade ocupe áreas do planeta onde o clima é extremamente adverso, locomova-se de forma rápida e mantenha um complexo sistema de civilização, empregando diferentes fontes energéticas em distintas regiões do planeta. Os **recursos energéticos** utilizados atualmente pelas nações industrializadas são os combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural), hidreletricidade, energia nuclear e outras formas de energia menos difundidas como geotérmica, solar, eólica, proveniente da biomassa, de marés e, mais recentemente, de ondas.

22.1 Biomassa

A **biomassa** foi, sem dúvida, o primeiro recurso energético utilizado pela humanidade. A queima de **lenha** foi responsável pelo fornecimento de energia desde os primórdios das civilizações, sendo utilizada principalmente nos países menos desenvolvidos. Estima-se que cerca de 10% dos fogões existentes na Terra ainda utilizem lenha como fonte de energia. Apesar de envolver a destruição de florestas, o cultivo controlado de árvores pode ser uma importante forma de geração de energia a custos relativamente baixos.

A biomassa pode também ser utilizada para a produção de combustíveis (por exemplo etanol e metanol), que podem substituir com certas vantagens outras fontes de energia (ver o quadro sobre o Proálcool).

22.2 Combustíveis Fósseis

Os **combustíveis fósseis** recebem esta denominação por derivarem de restos de plantas e animais soterrados juntamente com os sedimentos que formam as rochas sedimentares. O tipo de combustível fóssil formado depende da matéria orgânica original e da sua subsequente história geológica.

22.2.1 Carvão Mineral

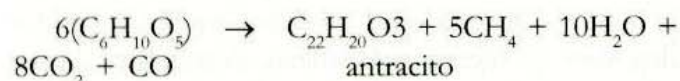
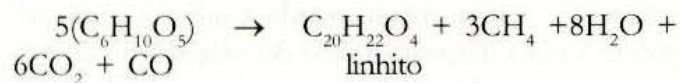
O **carvão mineral** é utilizado há mais de 2.000 anos, desde a época da ocupação romana da Inglaterra, quando era usado para aquecer as casas dos romanos. No entanto, sua importância maior surgiu com o desenvolvimento das máquinas a vapor, graças a seu alto conteúdo energético e sua grande disponibilidade na Europa e Ásia, e posteriormente no nordeste dos Estados Unidos. Ainda hoje é um componente importantíssimo na **matriz energética** (conjunto de fontes de energia que abastecem um país) de diversos países, por exemplo, Estados Unidos e China.

No Brasil, a existência de carvão no sul de Santa Catarina é conhecida desde 1827, quando tropeiros, acampados na região conhecida como Barro Branco, perceberam que algumas das rochas que haviam utilizado para a montagem de uma fogueira haviam entrado em combustão, transformando-se em cinzas. No entanto, foi somente durante a 2ª Grande Guerra que a exploração de carvão ganhou relevância, devido à necessidade de substituir os combustíveis importados. Outro grande avanço se deu após a primeira grande crise do petróleo (1973/1974), quando houve um enorme incentivo à produção de recursos energéticos alternativos. Atualmente a produção brasileira de carvão mineral é praticamente toda consumida em **termoelétricas**, ou seja, em usinas de geração de energia elétrica a partir do calor gerado pela combustão do combustível, representando hoje cerca de 1,5% da matriz energética do Brasil.

Como se forma o carvão?

O carvão é uma rocha sedimentar combustível, formada a partir do soterramento e compactação de uma massa vegetal em ambiente anaeróbico, em bacias originalmente pouco profundas (da ordem de dezenas a centenas de metros). À medida que a matéria

orgânica vegetal é soterrada, inicia-se o processo de sua transformação em carvão, devido principalmente ao aumento de pressão e temperatura, aliados à tectônica. Graças ao ambiente anaeróbico, e com a crescente compactação, os elementos voláteis e a água presentes na matéria orgânica original são expelidos, gerando, concomitantemente, uma concentração relativa de carbono cada vez maior. A principal matéria-prima do carvão é a celulose ($C_6H_{10}O_5$), e, dependendo das condições de P e T, e do tempo de sua atuação, sua transformação pode gerar, progressivamente, **turfa**, **linhito**, **carvão** (também chamado de **carvão betuminoso**) ou **antracito**, de acordo com o grau de maturação ou carbonificação, exemplificado pelas seguintes equações:



A Tabela 22.1 mostra a classificação adotada no Brasil para os diversos tipos de carvão mineral.

O carvão é denominado **húmico** quando formado a partir de vegetais superiores de origem continental ou paludal e **sapropélico** ou **saprotético**, quando gerado a partir de algas marinhas. Os carvões húmicos só se formaram na Terra a partir do Devoniano, período em que os vegetais superiores surgiram e passaram a ocupar grandes áreas. Hoje os carvões húmicos perfazem cerca de 95% das reservas conhecidas de carvão no mundo.

Os ambientes propícios à formação de depósitos de carvão são bacias rasas, deltas, estuários ou ambientes pantanosos, relativamente mal oxigenados. Muitos depósitos ocorrem em sucessões de repetidas transgressões e regressões marinhas que, com a variação do nível de base, possibilitaram o avanço de florestas durante o recuo do mar, seguida de soterramento quando o mar invadiu a região costeira novamente. Isto explica a ocorrência, numa mesma região, de diversas camadas de carvão intercaladas por sedimentos.

A distribuição de carvão mineral no mundo é irregular. A Rússia detém cerca de 50% das reservas conhecidas, enquanto os Estados Unidos contam com cerca de 30%. O Brasil conta com apenas 0,1% do carvão conhecido no mundo.

Tabela 22.1 Variação das características do carvão de acordo com o grau de carbonificação.

Parâmetros	Turfa	Linhito	Carvão	Antracito
Densidade (kg/m ³)	1.000	1.000 a 1.300	1.200 a 1.500	1.300 a 1.700
Umidade(%)	65 a 90	15 a 45	1 a 3	-
Carbono* (%)	± 55	65 a 75	75 a 90	90 a 96
Hidrogênio (%)	± 6	5	4,5 a 5,5	2 a 5
Oxigênio* (%)	± 33	25	3 a 11	4 a 11
Componentes Voláteis* (%)	± 60	± 40	10 a 45	3 a 10
Carbono Fixo (%)	± 25	± 35	25 a 80	± 90
Cinzas (%) (material não combustível)	± 10	± 9	0,5 a 40	3 a 30
Poder Calorífico cal/g	4.000 a 5.700	Até 5.700	5.700 a 9.600	8.200 a 9.200
Brilho	fosco	baixo	moderado	alto

(*) medidas sobre o carvão isento de umidade e cinza

O carvão brasileiro

Os carvões minerais explorados no Brasil são do tipo húmico, originados a partir de tecidos lenhosos, celulose, esporos, ceras, resinas, géis, betumes e hidrocarbonetos derivados de uma paleoflora, típica do Carbonífero e Permiano do antigo paleocontinente Gondwana e por diversas espécies de gimnospermas, pteridófitas (samambaias), licófitas e esfenófitas extintas.

O carvão é produzido no Brasil a partir de depósitos na Bacia do Paraná, principalmente nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, em rochas de idade permiana inferior (cerca de 260 Ma) (Fig. 22.1). A Fig. 22.2 mostra a distribuição do carvão mineral no Brasil.



Fig. 22.1 Mineração subterrânea de carvão na região de Criciúma, Santa Catarina. Foto: S. L. F. de Matos.



Fig. 22.2 Distribuição de ocorrências e jazidas de carvão mineral na borda leste da Bacia do Paraná.

Problemas Ambientais

A exploração do carvão mineral envolve a remoção, o transporte e o beneficiamento de grandes volumes de massa mineral, atividades que modificam o meio ambiente (Fig. 22.3). Contudo, a conscientização da necessidade da preservação do meio ambiente e a adoção de políticas que permitam um desenvolvimento sustentável são posturas relativamente recentes. Quando a mineração do carvão no Brasil intensificou-se, no início do século 20, poucos cuidados de preservação ambiental foram tomados. Com isso, muitas áreas produtoras de carvão mineral têm sofrido as consequências indesejadas de tal atitude.

O carvão mineral, por se formar sob condições anóxicas, é comumente associado a sulfetos, principalmente à pirita. Exposta à ação do oxigênio do ar e da água, a pirita sofre oxidação, gerando uma solução de ácido sulfúrico e sulfato ferroso, que é a principal fonte poluidora. Quando estes produtos, provenientes dos depósitos de rejeitos e das minas, alcançam os cursos d'água, acidificam as águas, aumentando o teor de sulfato, e desencadeiam uma série de reações químicas, como, por exemplo, a solubilização de metais pesados, ferro, manganês, cálcio, sódio etc. Adicionalmente, a reação exotérmica da oxidação dos sulfetos pode gerar calor suficiente para iniciar a autocombustão do carvão, com a liberação de H_2S ; além do odor desagradável, a liberação deste gás na atmosfera pode promover a posterior ocorrência de **chuvas ácidas**.

Até poucos anos atrás os rejeitos das usinas de beneficiamento eram depositados a céu aberto sem qualquer critério técnico, em áreas próximas às usinas, enquanto os efluentes (resíduos) líquidos eram lança-



Fig. 22.3 Mineração a céu-aberto de carvão na região de Charqueadas (RS), onde pode-se observar a grande mobilização de material para exploração do carvão mineral. Foto: S. L. F. de Matos.

dos diretamente nas drenagens. Só a partir do início da década de 1980 é que as primeiras providências oficiais foram tomadas para diminuir os impactos ambientais das atividades mineiras de carvão.

Embora a acidificação dos rios e a geração de chuva ácida sejam os mais graves problemas ambientais decorrentes da mineração do carvão, outros impactos, também graves, podem ocorrer, como degradação da paisagem, subsidência local, rebaixamento do nível freático, assoreamento das drenagens, poluição dos solos e doenças relacionadas ao trabalho.

22.2.2 Petróleo e gás natural

O **petróleo** é conhecido desde tempos remotos. A Bíblia já traz referências sobre a existência de lagos de asfalto. Nabucodonosor pavimentava estradas com esse produto na Babilônia, enquanto os egípcios o utilizavam como impermeabilizante. Por vários séculos o petróleo foi utilizado para iluminação.

Apesar da técnica de perfuração de poços profundos ser dominada desde 200 anos a.C., o objetivo exploratório era sempre água potável. Entretanto, durante o século XVIII já eram cavados poços a profundidades de até 50 metros que buscavam o petróleo. A vantagem desse procedimento era que o petróleo assim produzido era mais “leve” do que o aflorante naturalmente, ou seja, com os seus constituintes mais voláteis ainda presentes. No entanto, a construção desses poços era uma tarefa extremamente arriscada devido à presença de gases altamente inflamáveis. No início do século XIX, as primeiras destilarias foram construídas, visando a separação dos constituintes do petróleo. Paralelamente era desenvolvido o lampião a querosene, que produzia uma chama muito mais brilhante e com muito menos fumaça do que os que utilizavam petróleo bruto ou mesmo óleo de baleia. Na primeira metade do século XIX, foram construídas também as primeiras refinarias, que processavam o petróleo extraído dos poços cavados manualmente.

A moderna era do petróleo teve início quando um norte-americano conhecido como Coronel Drake encontrou petróleo a cerca de 20 metros de profundidade no oeste da Pensilvânia, utilizando uma máquina perfuratriz para a construção do poço. Sua descoberta causou tanta sensação na época que em apenas um ano 15 refinarias de petróleo foram instaladas na região. Na verdade, nessa época, os primeiros exploradores de petróleo foram pessoas ou empresas

ligadas ao ramo da mineração, que estavam acostumadas ao ciclo da indústria mineral (do ouro e do carvão). Nesses setores o minério é retirado da mina e comercializado ou armazenado em pilhas até a chegada de um comprador. Para eles havia também a possibilidade de interromper a mineração em épocas de baixa demanda, sem que o minério fosse perdido. A exploração do petróleo mostrou-se completamente diferente. Devido a seu estado líquido, após a perfuração normalmente ocorre surgência natural, o que torna difícil e extremamente oneroso tanto seu armazenamento para regular o fluxo de mercado, como seu transporte por grandes distâncias. Isso, aliado à descoberta de inúmeros outros campos petrolíferos, fez com que diversos desses exploradores, acostumados com outra realidade, falissem e o preço do petróleo caísse tremendamente. Para se ter uma idéia, o preço do barril de petróleo (unidade de medida de volume que equivale a aproximadamente 159 litros) caiu de cerca de US\$20 em 1860 para US\$ 0,10 em apenas dois anos.

No entanto, a grande revolução da indústria do petróleo ocorreu com a invenção dos motores de combustão interna e a produção de automóveis em grande escala que deram à gasolina (obtida a partir do refino do petróleo) uma utilidade mais nobre do que a simples queima ou descarte nos rios (prática comum no século XIX).

Petróleo e Gás

O petróleo é um líquido oleoso, normalmente com densidade menor que a da água. Sua cor varia desde o incolor até o preto, passando por verde e marrom.

Existem diversas teorias para explicar a origem do petróleo. A mais aceita atualmente é de sua origem orgânica, ou seja, tanto o petróleo como o **gás natural** são combustíveis fósseis, a exemplo do carvão. Sua origem se dá a partir de matéria orgânica (principalmente algas) soterrada juntamente com sedimentos lacustres ou marinhos.

Os ambientes que impedem a oxidação da matéria orgânica são aqueles de rápida sedimentação (e.g. plataformas rasas) ou de teor de oxigênio restrito (e.g. fundo oceânico). Em ambos os casos o ambiente anaeróbico permite o aprisionamento de matéria orgânica não oxidada. À semelhança dos processos que transformam restos vegetais em carvão mineral, vistos anteriormente, a matéria orgânica vai se

transformando, com a perda dos componentes voláteis e concentração de carbono até sua completa modificação para **hidrocarbonetos**. A grande diferença entre a formação do carvão mineral e dos hidrocarbonetos é a matéria-prima, ou seja, principalmente material lenhoso para o carvão e algas para os hidrocarbonetos, o que é definido justamente pelo ambiente de sedimentação. Normalmente, o petróleo e o gás coexistem, porém, dependendo das condições de pressão e temperatura, haverá maior quantidade de um ou de outro. A Fig. 22.4 mostra as modificações da matéria orgânica em hidrocarboneto com o incremento da profundidade e, conseqüentemente, das condições de pressão e temperatura.

A mais importante **rocha-fonte** de óleo e gás é formada por sedimentos finos, ricos em matéria orgânica, soterrados a uma profundidade mínima de 500m onde a rocha se comprime, diminuindo sua porosidade e, com a alta temperatura, induz os hidrocarbonetos a migrarem para cima, para um ambiente de menor pressão e maior porosidade. Esse movimento é chamado de **migração primária**.

À medida que o hidrocarboneto atinge materiais de maior permeabilidade, ele se move mais livremente, porém, devido ao fato de sua densidade ser inferior à da água, tende a subir para a superfície. Esta migração é chamada de **migração secundária**. Em seu caminho para a superfície, o hidrocarboneto, ao encontrar uma barreira relativamente impermeável, irá

se acumular logo abaixo. Diversos tipos de rocha podem ter esse papel, por exemplo folhelhos, argilitos, sal, etc. Essas rochas são chamadas **rochas capeadoras**. A rocha permeável em que o hidrocarboneto se acumula é chamada **rocha reservatório**.

Caso esse sistema (rocha reservatório mais rocha capeadora) forme uma estrutura que bloqueie o movimento ascendente do hidrocarboneto, este se acumulará, formando, assim, uma estrutura armazenadora de hidrocarboneto. Esse sistema, composto pela rocha reservatório e rocha capeadora, associadas à estrutura, é chamado **armadilha** ou **trapa**. Um aspecto curioso é que as concentrações de hidrocarbonetos apresentam, devido às diferenças de densidades, três níveis de fluidos, sendo que no superior fica o gás, no intermediário o petróleo e no inferior, água.

As armadilhas têm basicamente duas origens distintas: estratigráfica ou estrutural, mas podem ter diversas formas, sendo que alguns exemplos são apresentados na Fig. 22.5.

A “indústria” de hidrocarbonetos

A prospecção de hidrocarbonetos envolve as fases comuns de prospecção mineral, ou seja, o mapeamento geológico e geofísico da área, por meio de levantamentos aéreos e terrestres, o processamento desses dados e sua posterior interpretação. Paralelamente são perfurados alguns poços exploratórios para que os dados de mapeamento sejam correlacionados com a estratigrafia da região. Dos poços exploratórios são extraídos testemunhos, submetidos a análises geoquímicas e paleontológicas que indicarão a possibilidade de existência de hidrocarbonetos na região. A partir do conjunto de dados adquiridos nessa fase, é elaborado um modelo geológico-estratigráfico-estrutural da bacia, que servirá de base para a locação de levantamentos de maior detalhe com vistas à definição de possíveis armadilhas portadoras de hidrocarbonetos. Uma vez identificada uma armadilha em potencial (principalmente por meio de métodos geofísicos), é efetuada uma sondagem mecânica (perfuração) que irá comprovar a existência ou não do hidrocarboneto. Se encontrado, é iniciada a delimitação da reserva, quando diversos furos de sondagem são efetuados visando a definição do volume de hidrocarboneto contido. A fase seguinte é chamada de desenvolvimento, quando é montada a infra-estrutura para a exploração comercial (produção) do hidrocarboneto.

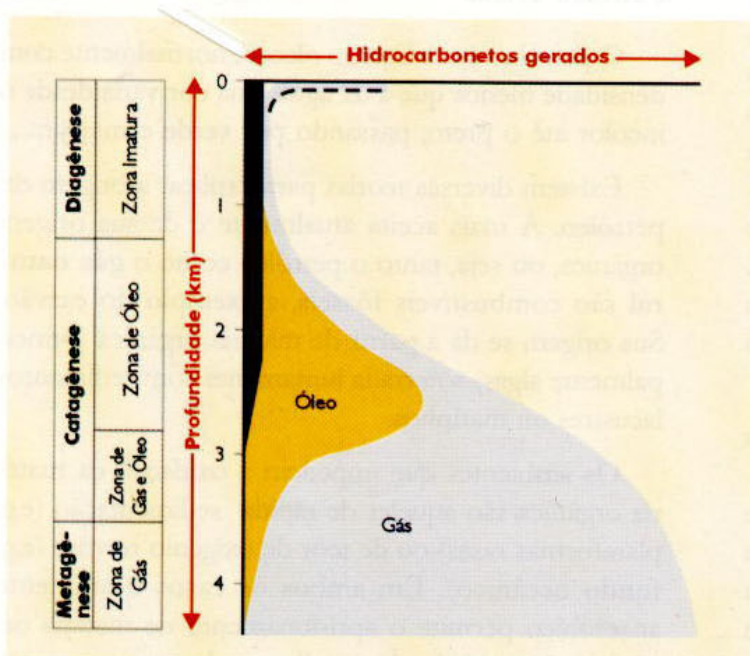


Fig. 22.4 Esquema simplificado da formação de hidrocarbonetos em função da profundidade.

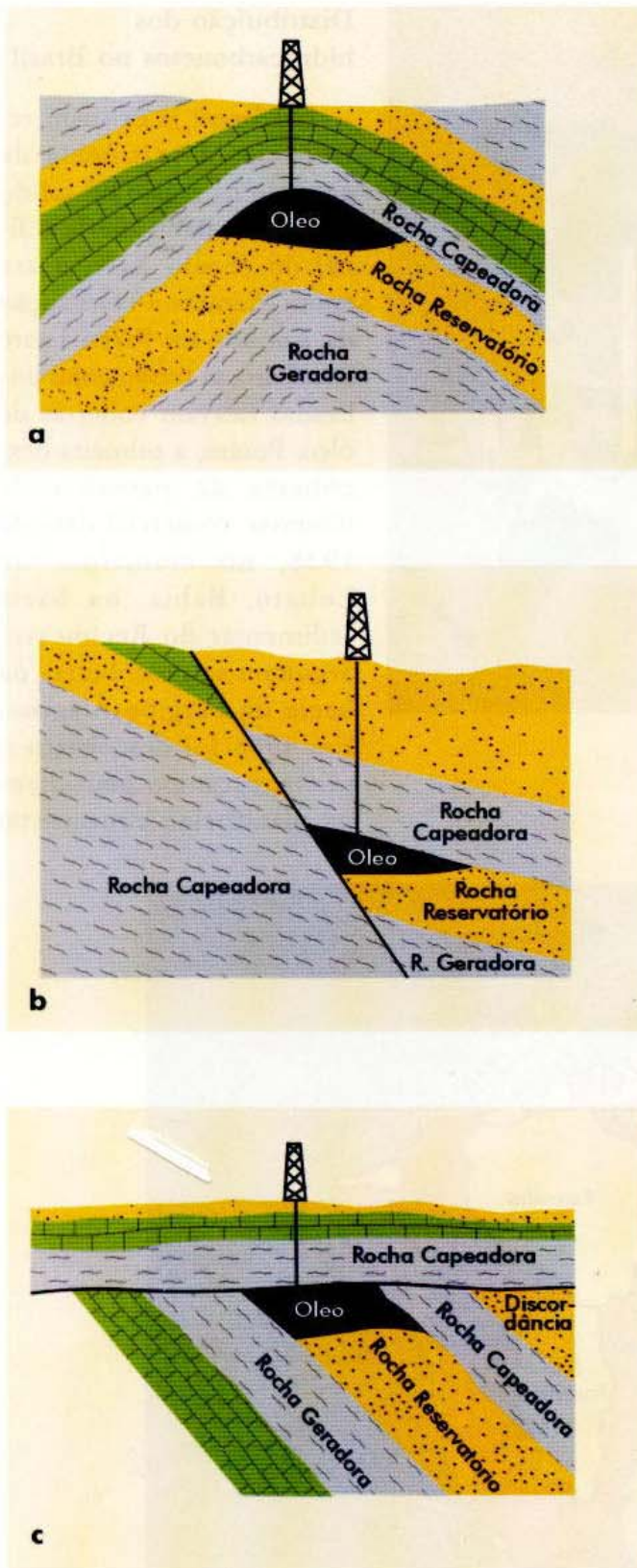


Fig. 22.5 Exemplos de trapas: (a) anticlinal, (b) falha, (c) discordância.

Durante a fase de produção, são efetuadas constantes reavaliações e reestudos que objetivam verificar se as hipóteses adotadas nas fases anteriores estão se confirmando.

Eventualmente, poderão ser necessários estudos mais detalhados para verificar se a recuperação do hidrocarboneto está ocorrendo de acordo com o esperado. Nesta fase utilizam-se levantamentos sísmicos de grande detalhe que geram imagens em três dimensões do reservatório.

Na moderna indústria de hidrocarbonetos, em todas as fases de exploração (ou prospecção) e produção, os diversos profissionais (geólogos, geofísicos, engenheiros, químicos, físicos e matemáticos) trabalham em conjunto, de forma a haver uma perfeita integração dos dados gerados por meio de cada técnica específica. Essa atitude leva a um desenvolvimento de técnicas indiretas de mapeamento e monitoramento, destacando-se, entre elas, a sísmica de reflexão, capaz de gerar imagens de grande fidelidade e correlação com a estratigrafia da área (Fig. 22.6).

Uma vez trazido à superfície, o petróleo é transportado à refinaria para a separação de seus diversos constituintes, produzindo desde os combustíveis de uso consagrado, tais como gasolina, óleo diesel, óleo combustível, querosene, GLP (gás liquefeito de petróleo), até asfalto e outros produtos. Já o gás natural, após um beneficiamento muito simples, é utilizado diretamente como combustível.

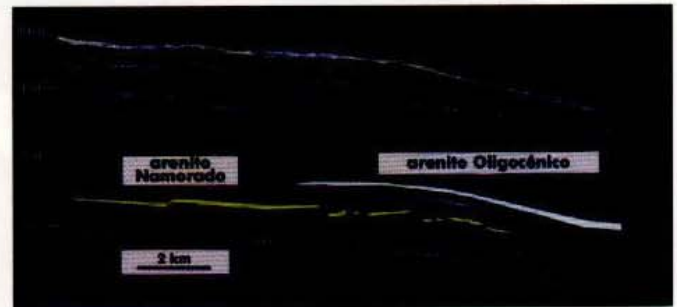


Fig. 22.6 Seção sísmica de uma armadilha e sua interpretação sismo-estratigráfica.

Ocorrência dos hidrocarbonetos no mundo

A ocorrência de hidrocarbonetos é variável no espaço e no tempo. Isto se deve ao fato de regiões outrora importantes produtoras terem exaurido suas reservas, ao mesmo tempo que novas reservas são descobertas em outras regiões.

Atualmente, a distribuição conhecida de hidrocarbonetos no mundo é extremamente irregular, ocorrendo uma grande concentração de petróleo no Oriente Médio e de gás na Europa Oriental. A Fig. 22.7 mostra a distribuição das reservas conhecidas de petróleo e gás.

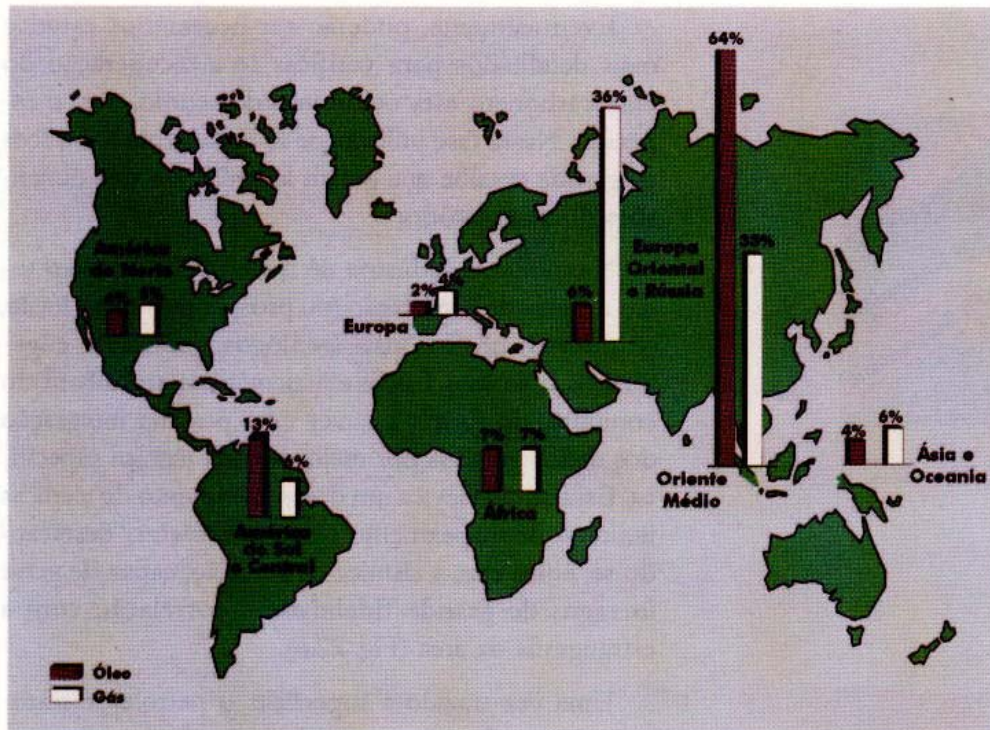


Fig. 22.7 Distribuição de petróleo e gás no mundo.

Distribuição dos hidrocarbonetos no Brasil

No Brasil já existiam referências à existência de petróleo na região do sul do Estado da Bahia desde o final do século XIX; nessa época, durante a construção da Estrada de Ferro Leste Brasileiro, as ferramentas utilizadas ficavam cobertas de óleo. Porém, a primeira descoberta de petróleo de interesse comercial data de 1938, no município de Lobato, Bahia, na bacia sedimentar do Recôncavo. Seguiram-se descobertas na bacia de Sergipe-Alagoas. Em 1968 foi descoberto o primeiro campo petrolífero na plataforma continental

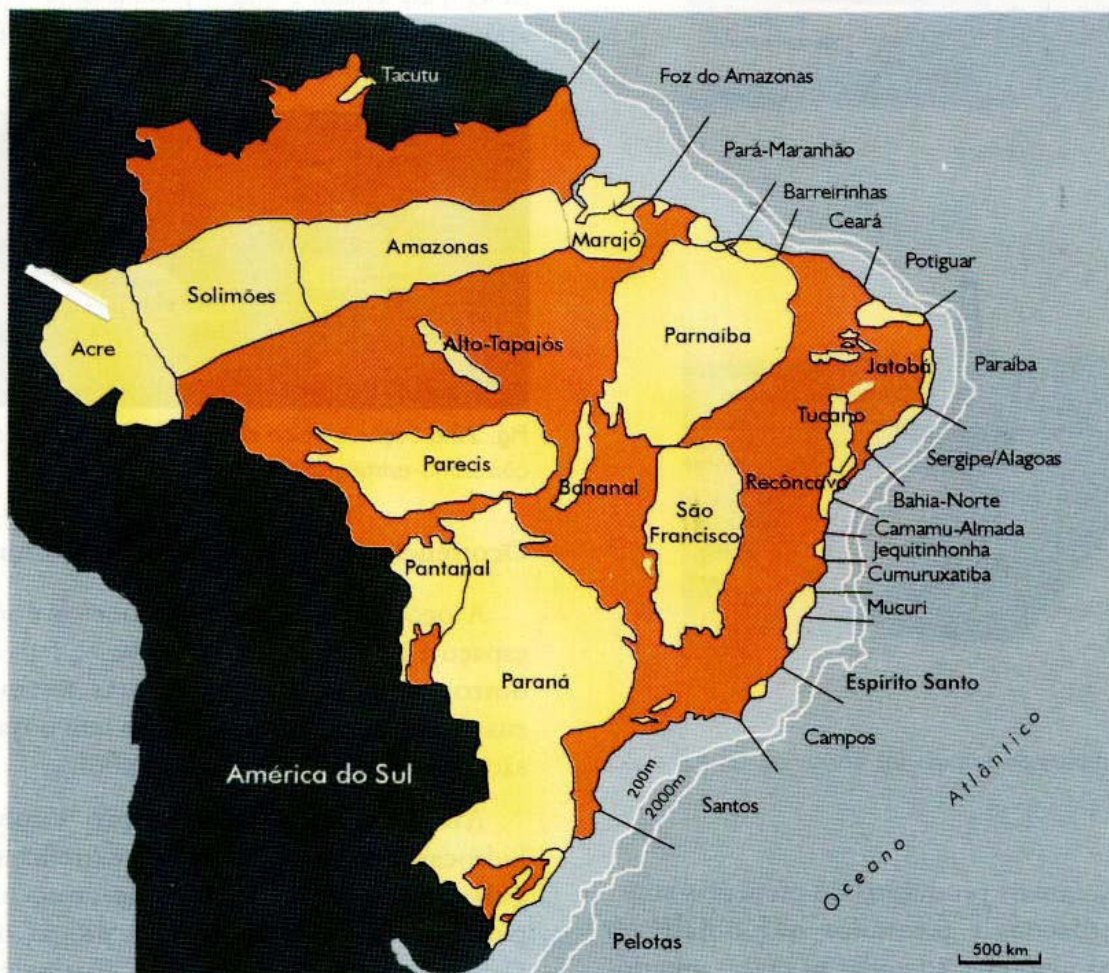


Fig. 22.8 Distribuição das bacias sedimentares brasileiras.

brasileira (Sergipe), seguindo-se, então, diversas descobertas, tanto no continente (Bacia do Espírito Santo, Bacia Potiguar, Bacia do Solimões e mais recentemente na Bacia do Paraná) como na plataforma continental (Potiguar, Campos, Foz do Amazonas, Ceará, Santos e Costa da Bahia) (Fig. 22.8). A Bacia de Campos possui as maiores reservas de petróleo conhecidas no Brasil, destacando-se os campos de Albacora, Marlin e Barracuda, todos em águas profundas (lâmina d'água superior a 800 metros), o que exigiu o desenvolvimento de tecnologia especial para torná-los produtores (Fig. 22.9).



Fig. 22.9 Mapa da Bacia de Campos mostrando os campos petrolíferos em exploração.

Apesar de as Bacias do Recôncavo e de Sergipe-Alagoas terem sido importantes produtoras, atualmente as Bacias de Campos e Potiguar respondem por quase toda a produção de hidrocarbonetos do Brasil.

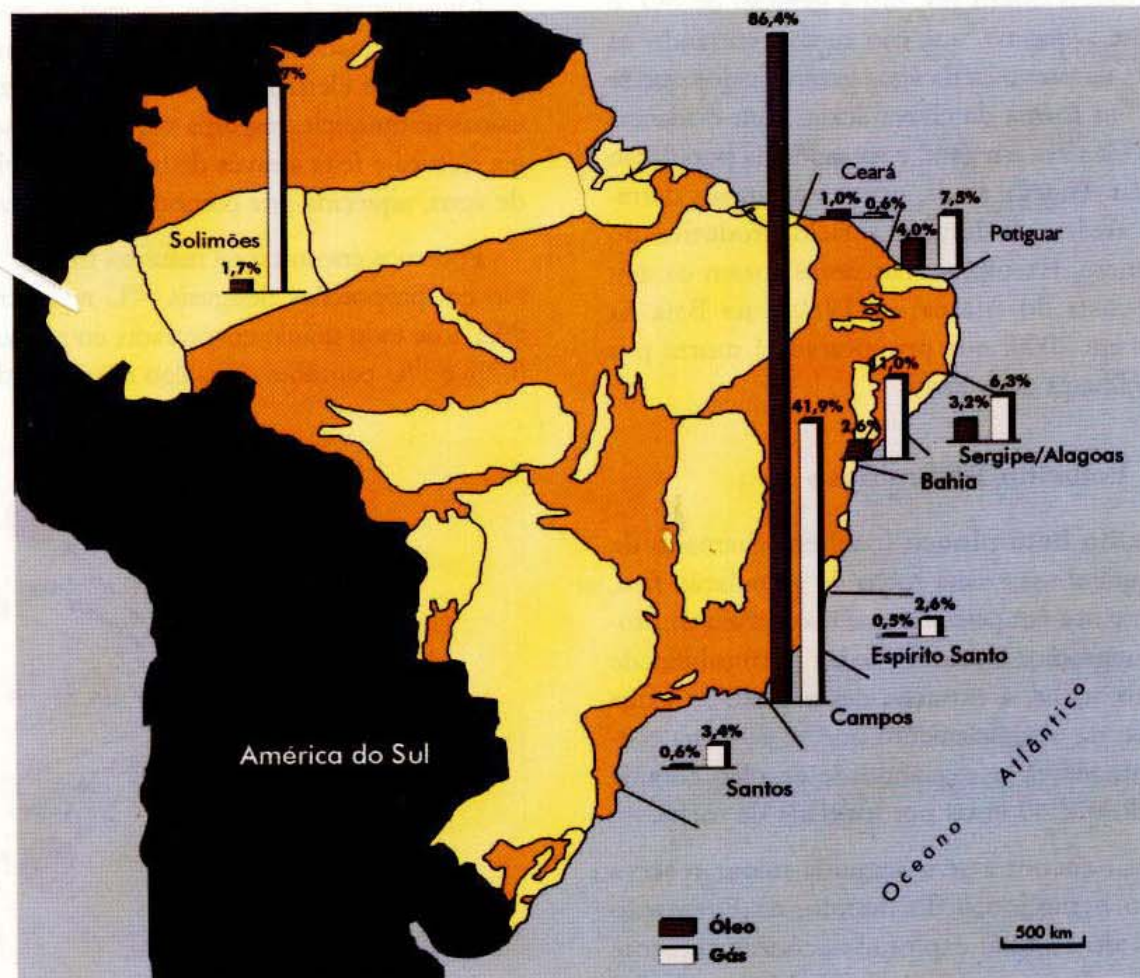


Fig. 22.10 Mapa com a distribuição de petróleo e gás no Brasil.

Impactos ambientais devidos à exploração e consumo de hidrocarbonetos

Como os outros combustíveis fósseis, os hidrocarbonetos devem ser de alguma forma queimados para aproveitar a energia neles armazenada.

Se imaginarmos que uma imensa quantidade de combustível ficou armazenada durante milhões de anos em sub-superfície e depois, em poucas décadas é queimada, é intuitivo imaginar que essa queima irá gerar uma grande quantidade de CO_2 num espaço de tempo relativamente pequeno. Sabe-se que o CO_2 na atmosfera deixa passar os raios solares, mas tende a absorver os raios infra-vermelhos irradiados pela Terra, funcionando como uma camada de “isolante” térmico. Portanto, essa produção de CO_2 anormal, derivada da queima de grande quantidade de combustível, poderá provocar o aquecimento global da Terra, conhecido como **efeito estufa**, acarretando o derretimento das calotas polares e inundação de terrenos litorâneos ou de baixa altitude. É exatamente esse o maior dano ambiental atribuído ao uso de hidrocarbonetos.

Outros danos dizem respeito à geração de SO_x e NO_x durante a queima, que vão se concentrando na atmosfera e, na presença da água geram ácidos que se precipitam em forma de chuva ácida, com evidentes reflexos na biosfera em geral e na saúde da população em particular. Podem, ainda, ocorrer eventuais derramamentos acidentais durante o ciclo produtivo do hidrocarboneto. Exemplos marcantes foram os acidentes na costa do Alasca em 1989 e na Baía da Guanabara em 2000, que provocaram a morte por asfixia de milhares de animais.

22.2.3 O Folhelho Betuminoso

O **folhelho betuminoso** (também chamado de “xisto” betuminoso) é uma rocha de granulação fina, relativamente rica em petróleo que não sofreu os processos de migração. Devido à baixa permeabilidade intrínseca da rocha, a extração desse petróleo exige um processo de beneficiamento que só se torna economicamente viável se a quantidade de óleo contida for maior do que 40 litros por tonelada de rocha.

No Brasil encontra-se a segunda maior reserva de folhelho betuminoso do mundo, na Formação Irati, Bacia do Paraná, explorada economicamente há vários anos no município de São Mateus do Sul

(PR), graças a um inovador processo de beneficiamento desenvolvido pela Petrobrás e denominado “Petrosix”.

22.3 Energia Nuclear

A **energia nuclear** é gerada pela **fissão** do núcleo do elemento Urânio (^{235}U) por bombardeamento de nêutrons (Fig. 22.11). Esta reação libera três nêutrons e calor. Os nêutrons liberados ativam novas reações que liberam mais nêutrons e mais calor, produzindo uma reação em cadeia. A partir do desenvolvimento de sistemas de controle dessa reação em cadeia, que ocorreu em 1942, foi possível utilizar a energia produzida na reação tanto para fins militares (na 2ª Grande Guerra), como para obtenção de energia termoelétrica. Atualmente estão em operação no mundo todo cerca de 440 usinas nucleares. É uma importante fonte de energia para alguns países, por exemplo na França, onde 75% da energia elétrica é produzida por usinas nucleares. No Brasil a energia nuclear ainda foi pouco explorada, tendo-se somente a Usina de Angra dos Reis em operação.

Os sistemas de geração de energia por fissão nuclear são chamados de reatores, e fazem parte das usinas geradoras de eletricidade, conhecidas também como usinas termonucleares, uma vez que a geração de energia elétrica é feita através de turbinas movidas a vapor de água, aquecida por combustível nuclear.

Podemos encontrar na natureza três isótopos de urânio em proporções desiguais. ^{238}U representa cerca de 99,3% de todo urânio encontrado, enquanto ^{235}U perfaz 0,7% e ^{234}U contribui com algo em torno de 0,005%.

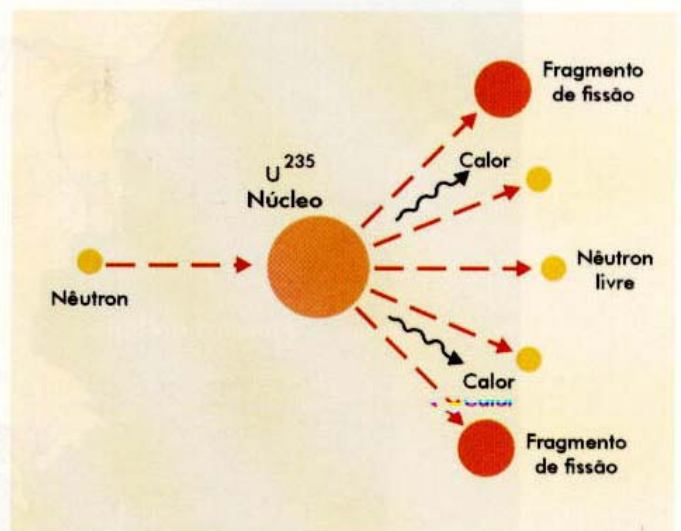


Fig. 22.11 Esquema da fissão nuclear do ^{235}U .

O ^{235}U é o único elemento fissionável que ocorre naturalmente, sendo, portanto, essencial para a produção de energia nuclear. No entanto, para ser utilizado como combustível, o minério deve ser concentrado até atingir um conteúdo de urânio de cerca de 3%, na forma de UO_2 gerando o produto chamado de **urânio enriquecido**. Por outro lado, o ^{238}U , após bombardeado por nêutrons, transforma-se em ^{239}Pu (plutônio), que é fissionável. O urânio enriquecido é colocado dentro de tubos feitos de uma liga metálica de zircônio e estanho (*zircaloy*) ou, eventualmente, de aço inoxidável. Estes tubos são enfeixados formando um arranjo reticulado que varia de tamanho, geometria e quantidade de tubos, dependendo do tipo de **reator**.

Existem basicamente dois tipos de reatores, conhecidos como BWR (*boiling water reactor* – reator de água fervente) e PWR (*pressurized water reactor* – reator de água pressurizada). Em média, os reatores do tipo BWR utilizam arranjo de aproximadamente 60 tubos pesando cerca de 320 kg, dos quais 180 kg são de urânio enriquecido. Já os arranjos para os reatores do tipo PWR pesam cerca de 650 kg, dos quais 460 são de urânio enriquecido, dispostos em 260 tubos. Os reatores BWR têm, em média, 750 arranjos, enquanto os do tipo PWR têm cerca de 150. A vida útil desses arranjos de combustível nuclear varia de 4 a 6 anos, quando então devem ser substituídos.

22.3.1 Como o reator funciona?

O reator nuclear é formado por uma cápsula de contenção que envolve a cápsula do reator, um certo número de arranjos de combustível nuclear, um circuito de tubos que leva água do reator para um gerador de vapor e de volta ao reator por meio de uma bomba, outro circuito de tubos que transporta o vapor de água à turbina geradora e outra bomba que faz o seu retorno para o gerador de vapor para ser reaquecido (Fig. 22.12). A chave do processo é o controle da reação em cadeia gerada pela fissão do ^{235}U , que produz calor. Esse controle é obtido por meio da inserção de varetas metálicas que absorvem nêutrons (feitas de cádmio ou boro), entre os arranjos de combustível, limitando a reação. Adicionalmente, como os arranjos de combustível são mantidos em água circulante, são resfriados, evitando a fusão do núcleo do reator. Se as varetas de controle forem todas inseridas entre os arranjos de combustível, a reação cessa, enquanto sua progressiva retirada gera cada vez mais calor.

Uma reação em cadeia de fissão estável no núcleo é mantida controlando-se o número de nêutrons que causam fissão, bem como a concentração de combustível. Uma concentração mínima de combustível é necessária para assegurar a reação crítica.

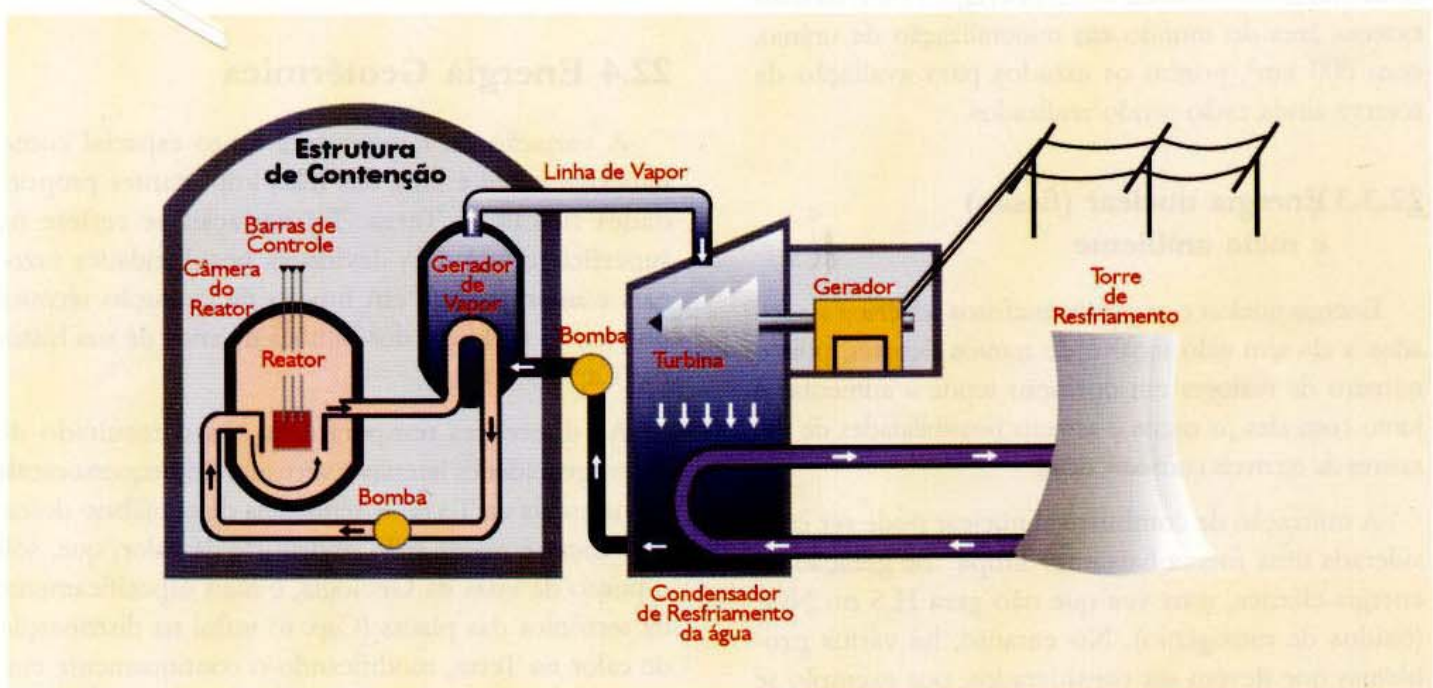


Fig. 22.12 Esquema simplificado de uma usina nuclear.

O núcleo do reator é mantido em uma caixa de aço inoxidável, sendo que, para uma segurança extra, o reator inteiro é guardado em uma construção de concreto.

No Brasil é gerada energia elétrica a partir de usinas nucleares no município de Angra dos Reis (RJ), com reatores do tipo PWR, com água como elemento moderador.

22.3.2 Distribuição do urânio

A concentração média de urânio na crosta terrestre é de cerca de 2 partes por milhão (2 ppm). Para ser considerada jazida, a concentração de urânio deve ser de 400 a 2.500 vezes sua concentração média.

No Brasil já foram estudadas e catalogadas dezenas de milhares de ocorrências de urânio. No entanto, uma ocorrência não leva necessariamente à descoberta de um depósito economicamente explorável. A primeira unidade mineira e de beneficiamento do Brasil iniciou suas atividades em 1982 no município de Caldas (sul de MG), tendo fornecido combustível para as usinas nucleares de Angra dos Reis. Com a exaustão dessa mina, o urânio passará a ser produzido na região sudoeste da Bahia, nos municípios de Lagoa Real e Catité, que apresentam reservas estimadas em 100.000 toneladas de urânio, sem outros minerais associados. No Ceará, município de Itaitaia, há outra jazida com reserva estimada também em 100.000 toneladas. Recentemente foi noticiada a descoberta, no Pará, da mais extensa área do mundo em mineralização de urânio, com 600 km², porém os estudos para avaliação da reserva ainda estão sendo realizados.

22.3.3 Energia nuclear (fissão) e meio ambiente

Energia nuclear e os possíveis efeitos adversos associados a ela têm sido motivo de muitos debates, pois o número de reatores em operação tende a aumentar e junto com eles os riscos e as reais possibilidades de desastres de terríveis conseqüências.

A utilização de combustível nuclear pode ser considerada uma forma bastante “limpa” de geração de energia elétrica, uma vez que não gera H₂S ou NO_x (óxidos de nitrogênio). No entanto, há vários problemas que devem ser considerados, por exemplo se uma usina sofrer um acidente e se romper, como o ocorrido em Chernobyl em 1986, onde erros de ope-

ração aliados a mau funcionamento dos sistemas de segurança provocaram o superaquecimento e posterior combustão do núcleo do reator, causando uma explosão liberando gases e partículas radioativas para a atmosfera. A repetição de um acidente desse tipo, contudo, é muito difícil de ocorrer uma vez que aquela usina utilizava tecnologia ultrapassada e fora de uso há muitos anos. Para se ter uma idéia, ocorreram apenas dois acidentes com vazamento de radioatividade em cerca de 50 anos de operação das usinas nucleares, evidenciando os grandes cuidados com a segurança das usinas. Contudo, deve ser lembrado que um único acidente com qualquer das usinas pode atingir grandes proporções, com efeitos ambientais duradouros. No entanto, o maior problema ambiental diz respeito à disposição dos rejeitos radioativos gerados pela usina. Estes rejeitos são compostos de elementos radioativos de meia-vida longa. A grande questão é como dispor e isolar de maneira segura tais rejeitos, para não contaminar os recursos hídricos ou mesmo a atmosfera. Nenhum país usuário de energia nuclear encontrou uma solução definitiva para este problema que se agrava a cada ano à medida que novas unidades entram em operação e os rejeitos são acumulados em depósitos provisórios, sem condições adequadas de segurança a longo prazo, inclusive no Brasil.

Recentemente, atendendo à pressão dos órgãos ambientalistas, a Alemanha resolveu desativar progressivamente suas usinas nucleares.

22.4 Energia Geotérmica

A variação da temperatura tanto espacial como temporalmente é uma das mais importantes propriedades físicas da Terra. Tal variação se reflete na superfície do planeta devido às peculiaridades sazonais e internamente em função da evolução térmica do planeta ao longo dos bilhões de anos de sua história (Caps. 5 e 15).

As diferentes temperaturas são o resultado de heterogeneidades laterais e verticais em pequena escala ou na escala da Terra. A tendência de equilíbrio destas diferenças é regida pelo transporte de calor, que, sob o ponto de vista da Geologia, e mais especificamente da tectônica das placas (Cap. 6) influi na distribuição de calor na Terra, modificando-o continuamente tanto no interior como nas camadas mais superficiais do planeta.

22.4.1 Gradiente geotérmico

O gradiente geotérmico é simplesmente uma expressão da diferença de temperatura entre duas superfícies ou dois pontos na Terra. O gradiente, assim como a temperatura, depende do tempo e de sua posição espacial, e sua dimensão é normalmente dada em $^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Sempre que houver um gradiente térmico entre dois pontos, ocorrerá um processo dinâmico que vise o estabelecimento do equilíbrio diminuindo esse gradiente. Durante esse processo ocorre a transferência de calor do ponto mais quente para o mais frio, segundo a direção do gradiente. Essa transferência de energia é chamada de **fluxo térmico** (Q). O fluxo térmico, por sua vez, depende de uma característica de cada material, chamada de **condutividade térmica**. A unidade normalmente utilizada para dimensionar o fluxo térmico é mW/m^2 .

A transferência de calor na Terra é dada, por sua vez, por meio de três mecanismos distintos, descritos a seguir.

22.4.2 Condução

A transferência de calor por condução se dá pela transferência de calor entre moléculas devido ao contato físico entre elas. Portanto a condução depende da estrutura molecular do material. Desta forma, observa-se que os metais são bons condutores de calor, enquanto as rochas em geral são pobres condutores. Dentre estas, as rochas básicas e ultrabásicas apresentam melhor condutividade do que as alcalinas e ácidas.

22.4.3 Convecção

A transferência de calor causada pelo deslocamento de um fluido é chamada de convecção. Trata-se de um processo extremamente mais eficiente do que a condução, predominando na astenosfera, e também no núcleo externo.

22.4.4 Radiação

Todo objeto emite energia na forma de radiação eletromagnética; a emissão na faixa de comprimento de onda entre 10^{-3} e 10^{-6} metros (região do infra-vermelho) é um poderoso mecanismo de transferência de calor. Este processo pode ocorrer mesmo quando a transferência por condução e convecção é impossível, pois independe de contato molecular, e torna-se particu-

larmente eficiente quando a temperatura do material ultrapassa os 1.000°C . É o mecanismo principal de transferência de calor do núcleo interno para as camadas mais periféricas.

22.4.5 Condições térmicas da crosta terrestre

Vários fatores ambientais afetam a temperatura das camadas superiores da crosta terrestre, sendo que três deles merecem ser citados:

- a temperatura em sub-superfície é alterada por variações de temperatura tanto diárias como anuais ou de longo termo, o que é refletido, por exemplo, pelas glaciações e deglaciações;
- a distribuição de temperatura é modificada pela morfologia da superfície (por exemplo pela presença de cadeias de montanhas) e estruturas geológicas de regiões adjacentes à crosta (por exemplo pela presença de batólitos);
- movimentos de água, fluidos hidrotermais e eventos tectônicos que são capazes de movimentar grande quantidade de calor através de convecção ao invés de condução térmica.

Apesar da quantidade de calor irradiado pelo Sol e recebido pela crosta terrestre ser da ordem de 2.500 vezes o irradiado pela Terra, esta energia é dissipada nos primeiros centímetros ou metros da crosta (Fig. 22.13). Portanto, são as fontes de calor internas na Terra que exercem total influência nos eventos tectônicos.

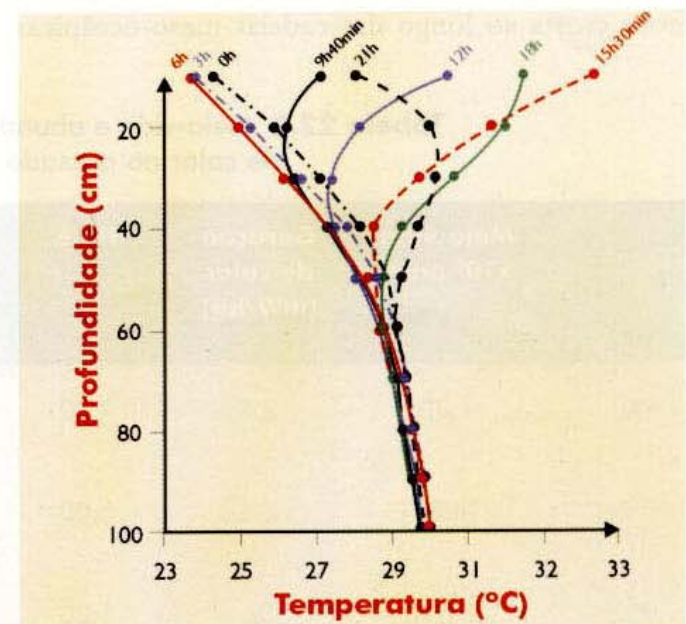


Fig. 22.13 Variação da temperatura do solo a diferentes profundidades, em diferentes horários do dia. Medidas efetuadas no Nordeste do Brasil.

22.4.6 Fontes de calor da Terra

As teorias hoje aceitas para a origem do calor da Terra consideram duas fontes principais, o calor original, gerado por ocasião de sua formação, e o calor gerado pelo decaimento natural de elementos radioativos presentes na composição química da Terra (Capítulos 3, 4 e 5).

A principal fonte de calor da Terra, a partir do Arqueano, tem sido o decaimento isotópico de elementos radioativos de longa vida média (comparável à idade da Terra). Estes elementos são apresentados na Tabela 22.2, com dados de suas abundâncias relativas calculadas a partir do conhecimento de suas meia-vidas. Evidentemente, durante os primeiros estágios do desenvolvimento da Terra, o calor gerado pelo decaimento isotópico de elementos radioativos de meia-vida média e curta contribuiu significativamente no balanço energético.

22.4.7 Comparação entre litosfera continental e oceânica

O fluxo térmico nos continentes é menor do que nos assoalhos oceânicos. Valores médios podem ser considerados 55 ± 5 mW/m² para os continentes e 95 ± 10 mW/m² para os oceanos. Além da diferença de condutividade térmica entre a crosta continental e oceânica (devido à própria diferença litológica), a diferença em fluxo térmico é também atribuída ao fenômeno de formação de nova crosta ao longo das cadeias meso-oceânicas

(Cap.6), onde a surgência de novo material rochoso e a ação hidrotermal nos oceanos com crosta oceânica jovem gera calor convectivo. Portanto, à medida que se afasta das cadeias meso-oceânicas ocorre uma grande diminuição no fluxo térmico.

O fluxo térmico é mais elevado (100 a 200 mW/m²) em regiões de crosta oceânica mais jovem, decaindo até um valor constante de 50 mW/m² para as rochas oceânicas mais antigas (200 milhões de anos), valor este que representa uma estabilidade da crosta oceânica. Por outro lado, o fluxo térmico em regiões continentais que experimentaram algum tipo de magmatismo ou metamorfismo é elevado, decrescendo para um valor constante de 40 a 50 mW/m² após 1.000 milhões de anos de tal atividade, e só então atingindo a estabilidade. Uma vez que a concentração de materiais radioativos na litosfera oceânica é tão pequena que chega a ser desprezível, o fluxo térmico aí é função apenas do calor conduzido e do último evento magmático. Já para a litosfera continental, devido à sua maior heterogeneidade, o fluxo térmico advém da crosta inferior, manto superior, elementos radioativos, e também do último evento metamórfico ou magmático.

Apesar das dificuldades para a determinação do valor de fluxo térmico, tanto em escala global como em escala local, áreas geotermicamente anômalas apresentam-se também sismicamente ativas, conforme já foi discutido nos Caps. 5, 6 e 17.

Tabela 22.2 Meia-vida e abundância relativa de isótopos produtores de calor no passado em relação ao presente.

	Meia vida x10 ⁹ anos	Geração de calor (mW/kg)	Hoje	10 ⁹ anos atrás	2x10 ⁹ anos atrás	3x10 ⁹ anos atrás	4,5x10 ⁹ anos atrás
⁴⁰ K	1,30	2,8	1,00	1,70	2,89	4,91	10,90
²³² Th	14,01	2,6	1,00	1,05	1,11	1,16	1,25
²³⁵ U	0,704	56	1,00	2,64	6,99	18,50	80,00
²³⁸ U	4,97	9,6	1,00	1,17	1,36	80,00	2,00

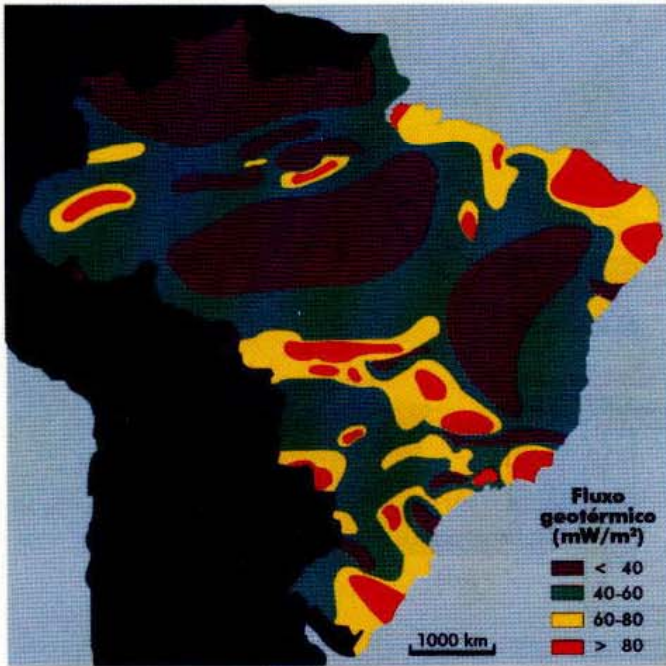


Fig. 22.14 Mapa do fluxo térmico do Brasil (cedido por V. M. Hamza).

No Brasil há uma relativa estabilidade tectônica, porém, a distribuição geotérmica não é regular, como pode ser observado no mapa geotérmico apresentado na Fig. 22.14.

22.4.8 Sistemas de aproveitamento da energia geotérmica

A conversão do calor natural do interior da Terra (**energia geotérmica**) para aquecimento de edifícios e geração de eletricidade resulta da aplicação dos conhecimentos geológicos à engenharia. A idéia de se trabalhar com o calor interno da Terra não é nova. Já em 1904, a energia geotérmica foi aproveitada na Itália usando o vapor seco. No entanto, o interesse pela energia geotérmica aumentou na crise energética da década de 1970, devido à elevação mundial do preço do petróleo. Constitui-se numa fonte energética considerada limpa quando comparada às energias termoelétrica e nuclear, já que o vapor e água geotermal não produzem resíduos e geralmente contêm baixa quantidade de CO_2 , um dos gases que pode causar o aquecimento global pelo efeito estufa.

O desenvolvimento comercial de energia geotérmica é possível em regiões com fluxo relativamente alto de calor, ou seja, em áreas onde a fonte de calor, tal como o magma, é relativamente próxima à superfície (3 a 10 km) e está em contato com as águas subterrâneas circulantes. Um exem-

plo de local apropriado para seu aproveitamento comercial é onde ocorrem *gêisers*, com atividade vulcânica recente, ou outros pontos quentes localizados próximos à superfície, que podem ser detectados utilizando métodos diretos (sondagem) ou indiretos (geofísica) de prospecção.

Dependendo das características geológicas da área geotermicamente anômala, diferentes sistemas de aproveitamento são utilizados. Estes sistemas são chamados de: 1) convecção hidrotermal, 2) sistemas ígneos quentes e 3) sistemas de geopressurização.

Sistema Convectivo Hidrotermal

Este sistema é caracterizado por um leito permeável no qual circula uma quantidade variável de água quente. Os sistemas de convecção hidrotermal compreendem reservatórios naturais de água e vapor em profundidade. Próximo à superfície, onde a pressão é menor, a água flui na forma de vapor superaquecido, que pode ser captado e canalizado diretamente para turbinas para produzir eletricidade (analogamente a uma termoelétrica) (Fig. 22.15). Nesse sistema a recarga de água subterrânea lenta permite que as rochas quentes convertam a água em vapor.

Sistema Ígneo Quente

Este sistema pode envolver a presença de magma a temperaturas de 650 a 1.200°C, dependendo do tipo de magma. Mesmo se a massa ígnea não estiver fundida, ela pode envolver uma grande quantidade de rochas quentes. Estes sistemas contêm mais calor armazenado por unidade de volume que qualquer outro sistema geotermal; entretanto, neles falta a água quente de circulação que existe no sistema de convecção.

Alguns desses reservatórios geotérmicos com rochas quentes e secas, por serem subsuperficiais, são acessíveis para perfuração, podendo mesmo ser fraturadas com explosivos ou técnicas de hidrofraturamento. Assim, a água pode ser injetada, a partir da superfície, dentro da rocha em um local e bombeada com temperaturas elevadas em outro local, recuperando-se o calor. O vapor d'água assim produzido é utilizado na geração de energia elétrica, analogamente ao sistema convectivo hidrotermal (Fig. 22.16). Apesar de ser um sistema tecnicamente aplicável para profundidades até 10 km, a tecnologia de perfuração e aproveitamento do calor ainda não está desenvolvida.

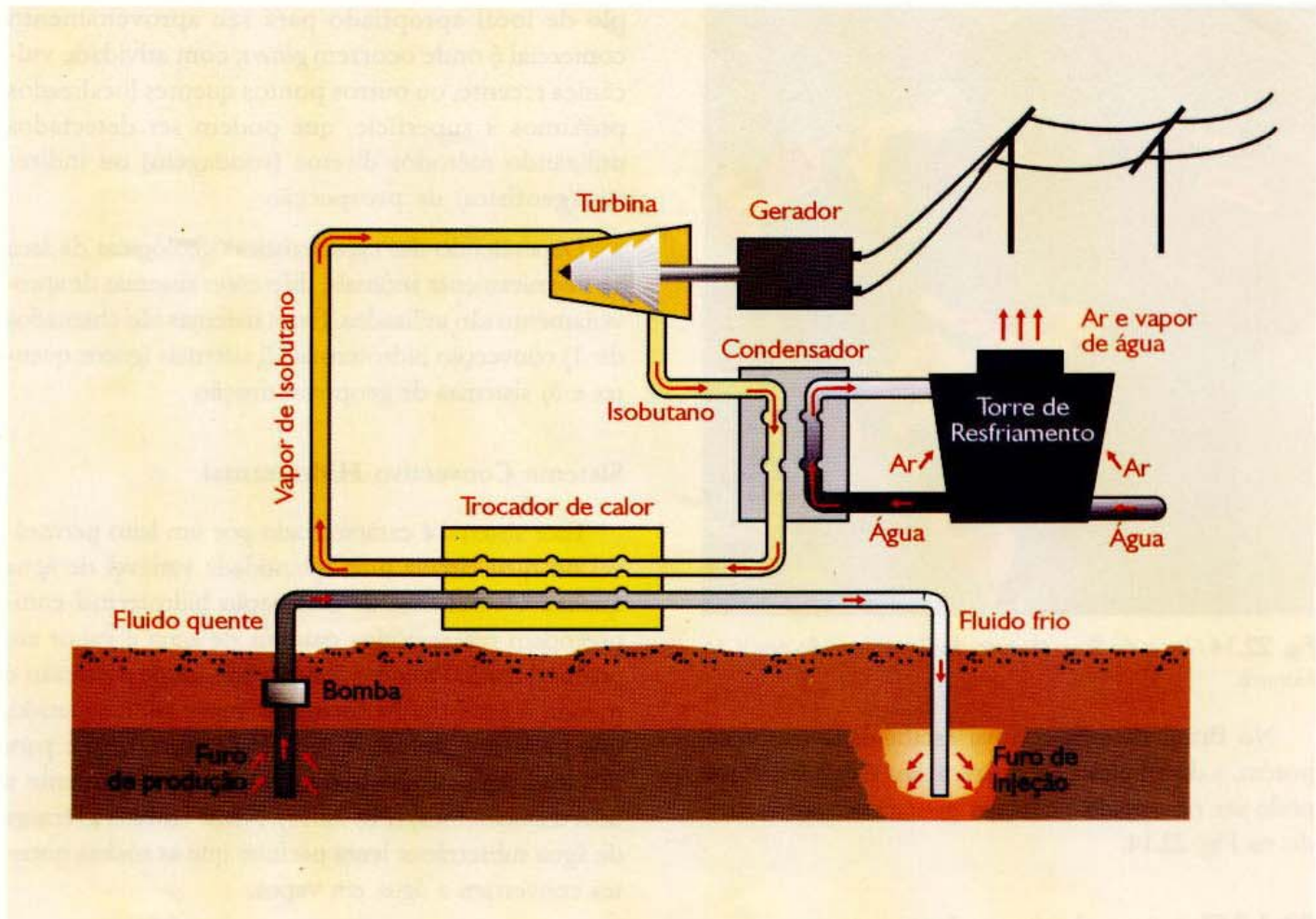


Fig. 22.15 Diagrama esquemático do aproveitamento de energia pelo sistema convectivo hidrotermal.

Sistema Geopressurizado

Este sistema ocorre naturalmente quando o fluxo normal de calor da Terra é impedido por rochas impermeáveis que atuam como um eficiente isolante térmico. Tal situação pode ocorrer em sedimentos depositados rapidamente em bacias que estão passando por subsidência regional. A água assim aprisionada ganha considerável pressão e conseqüente temperatura. Adicionalmente, a água aprisionada pode conter grande quantidade de gás metano, que também pode ser explorado.

22.4.9 Utilizações de energia geotérmica

A utilização da energia geotérmica para fins elétricos foi efetuada pela primeira vez no início do século XX na Itália, na região da Toscana. O aproveitamento de campos geotérmicos de regiões vulcânicas recentes encontra-se em franca expansão. Vapores geotérmicos são empregados em usinas de produção de eletricidade em regiões da Europa,

Nova Zelândia, Japão, Islândia, América Central, América do Norte e América do Sul. Na ilha do Havá, por exemplo, na primeira perfuração (1.970m) realizada nas proximidades do vulcão Kilauea foi obtido vapor geotérmico com temperatura de 350°C. A realização de outros poços na área permitiu a instalação de uma usina de energia de 25 MW responsável pela produção de uma parte significativa da eletricidade da ilha.

O maior campo de exploração de energia geotérmica localiza-se na costa da Califórnia (EUA). São cerca de 600 perfurações que produzem vapor a 240°C extraído de um reservatório de arenito argiloso muito fraturado. A produção atual alcança 1.200 MW de energia, suficiente para abastecer uma cidade com cerca de 1.000.000 de pessoas. A energia geotérmica é considerada uma fonte inesgotável de energia na escala humana de tempo, uma vez que a recarga de água meteórica que penetra além dos limites externos da cobertura rochosa imper-

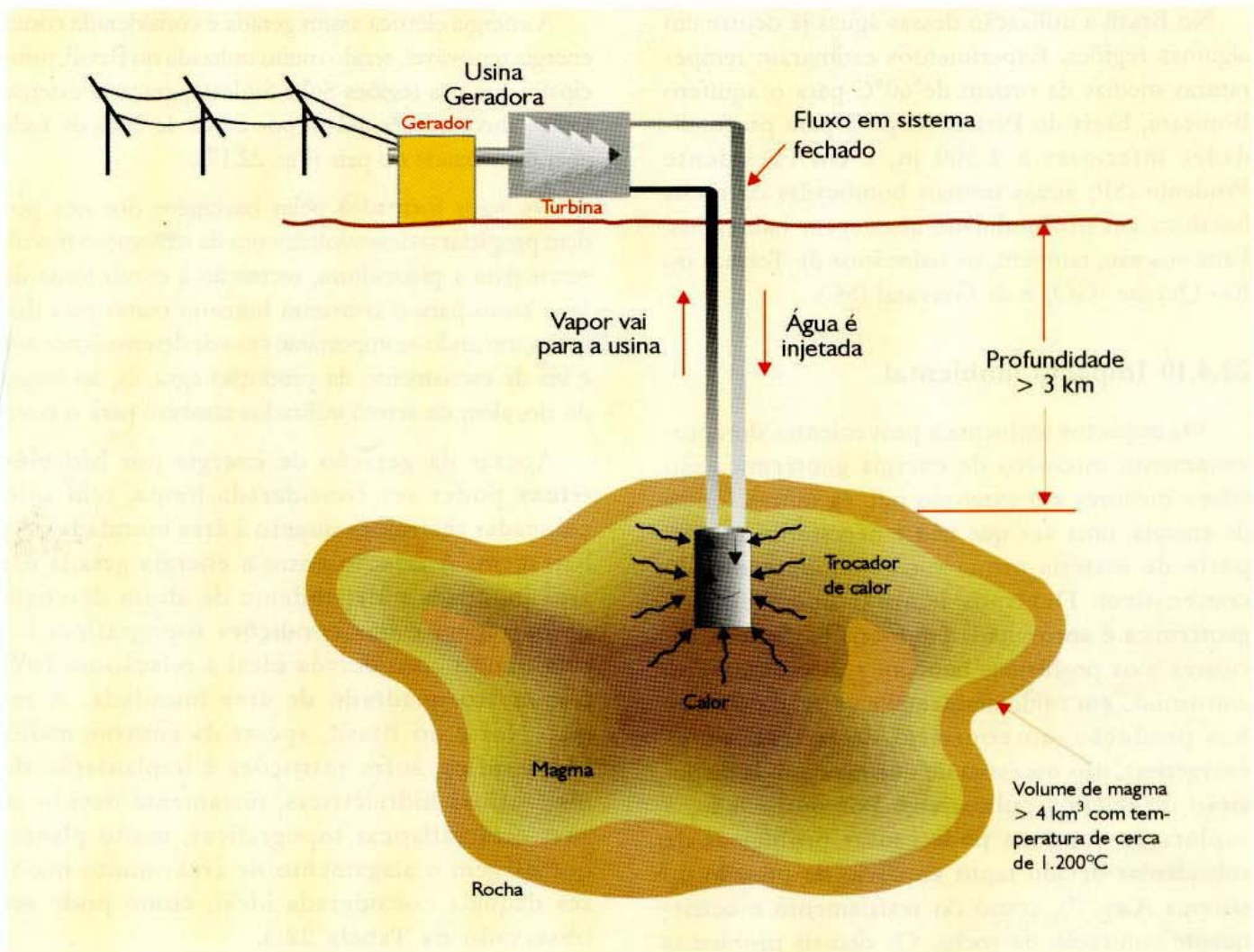


Fig. 22.16 Aproveitamento energético de um sistema ígneo quente.

meável é contínua. Entretanto, na usina da Califórnia a extração rápida de enormes quantidades de vapor tem causado uma diminuição na pressão com conseqüente redução na produção de energia no campo geotérmico. Novas técnicas de injeção de água e taxas menores de produção de vapor deverão ainda prolongar a vida útil deste campo por várias décadas. Os aquíferos com baixo conteúdo de calor (baixa entalpia) podem também ser úteis para substituir fontes de energia mais caras em determinadas situações, uma vez que as tecnologias modernas de isolamento térmico permitem o transporte desses fluidos a distâncias superiores a 10 km sem grandes perdas de calor. Águas com temperaturas inferiores a 100°C podem ser empregadas, por exemplo, em habitações e estufas, nas indústrias de lã e de refrigeração, nos processos de dessalinização de água do mar e na criação de animais.

Aplicações não elétricas dos fluidos geotérmicos a baixa entalpia já existem em muitos países do mundo. Por exemplo, na região de Paris, vários milhares de habitações são aquecidas por águas com temperaturas entre 60 e 73°C, provenientes de profundidades em torno de 1.800 m. Na Islândia os *geísers* e fontes quentes que nascem em meio aos derrames de lava constituem parte da vida diária. Em Reykjavik, a capital, a maioria das habitações é aquecida e servida por águas com temperaturas até 100°C, cujas fontes termais são basaltos muito porosos. Essas águas quentes são utilizadas por lavanderias e também para irrigar a terra, possibilitando o cultivo de plantações próximas ao círculo ártico. As águas termais das ilhas vulcânicas do Japão são de longa data uma fonte de lazer, a exemplo dos tradicionais banhos comunitários até hoje praticados, bem como em hospitais nos programas de reabilitação de pacientes com artrose e reumatismo.

No Brasil a utilização dessas águas já ocorre em algumas regiões. Experimentos estimaram temperaturas médias da ordem de 60°C para o aquífero Botucatu, bacia do Paraná (Cap. 7) para profundidades inferiores a 2.500 m, e em Presidente Prudente (SP) águas termais bombeadas da rocha basáltica em profundidade abastecem balneários. Famosos são, também, os balneários de Termas do Rio Quente (GO) e de Gravataí (SC).

22.4.10 Impacto ambiental

Os impactos ambientais provenientes do aproveitamento intensivo de energia geotérmica são talvez menores em extensão que as outras fontes de energia, uma vez que não é necessário o transporte de matéria-prima ou beneficiamento do combustível. Devemos lembrar que a energia geotérmica é aproveitada em locais bastante particulares e os problemas também serão localizados, consistindo em ruído ambiental e geração de gases. Sua produção, ao contrário de outras fontes energéticas, não necessita de queima nem da disposição de rejeitos radioativos. Por outro lado, a exploração contínua pode causar problemas de subsidência devido tanto ao alívio de pressão do sistema (Cap. 7), como do resfriamento e consequente contração da rocha. Os demais problemas ambientais são advindos das obras de engenharia civil necessárias para a implantação da usina.

22.5 Hidreletricidade

Barragens já eram construídas na antiguidade para regularizar o suprimento de água das cidades, para irrigação das lavouras e para o controle de inundações. Com o desenvolvimento do uso de energia elétrica no final do século XIX, as barragens passaram a ser utilizadas também para geração de energia elétrica, aproveitando o gradiente hidráulico dos rios, promovendo um fluxo de água contínuo, que é utilizado para mover turbinas e geradores de energia elétrica. A seleção dos locais para a implantação de barragens leva em consideração a largura do rio e a topografia no entorno para maior aproveitamento do gradiente do rio e para evitar a inundação de uma área muito extensa, já que esta área será inutilizada para outro aproveitamento econômico.

A energia elétrica assim gerada é considerada como energia renovável, sendo muito utilizada no Brasil, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, graças à extensa malha fluvial, responsável por cerca de 30% de toda energia utilizada no país (Fig. 22.17).

Os lagos formados pelas barragens dos rios podem propiciar o desenvolvimento da navegação fluvial, servir para a piscicultura, recreação e como fonte de água tanto para o consumo humano como para irrigação, tornando-se importante fator de desenvolvimento e via de escoamento da produção agrícola, ao longo do rio, além de serem utilizados também para o lazer.

Apesar da geração de energia por **hidrelétricas** poder ser considerada limpa, têm sido colocadas restrições quanto à área inundada pela barragem. A relação entre a energia gerada e a área inundada é dependente da altura de crista da barragem e das condições topográficas locais, sendo considerada ideal a relação de 10W por metro quadrado de área inundada. A região Norte do Brasil, apesar da enorme malha hidrográfica, sofre restrições à implantação de mais usinas hidrelétricas, justamente devido às suas características topográficas, muito planas, que exigem o alagamento de áreas muito maiores daquela considerada ideal, como pode ser observado na Tabela 22.3.

Tabela 22.3 Comprometimento ambiental de algumas usinas hidrelétricas brasileiras

Usina	Produção/Área inundada (W/m ²)
Xingó (SE/AL)	58,8
Segredo (SC)	15,3
Itaipu (PR)	9,4
Itaparica (PE)	1,8
Tucuruí (PA)	1,4
Porto Primavera (SP/MS)	0,85
Serra da Mesa (GO)	0,67
Balbina (AM)	0,11
Ideal	10



Fig. 22.17 Usina de aproveitamento múltiplo Três Irmãos (Pereira Barreto, SP). Foto: CESP.

Diversos fatores contribuem para aumentar as restrições à implantação de barragens. Entre eles pode-se destacar a necessidade de desmatar a área do lago, a possibilidade de ocorrer salinização da água do reservatório devido ao aumento da evaporação, a eventual necessidade de deslocar cidades, povoados ou populações indígenas e a também eventual inundação de atrações turísticas (a exemplo do que ocorreu com Sete Quedas (no rio Paraná). Pode também ocorrer assoreamento nos reservatórios das barragens, o que levaria a uma diminuição significativa de sua capacidade de geração de energia e mesmo de sua vida útil. Este fator se torna mais relevante pois, normalmente, a implantação de uma barragem gera desenvolvimento populacional nas margens do lago e o conseqüente incremento na taxa de urbanização que, se não seguir um planejamento adequado, pode contribuir ainda mais para o assoreamento dos lagos. Outro questionamento diz respeito à destinação que será dada às barragens quando do término de sua vida útil.

22.6 Outras Fontes de Energia

Além das fontes de energia já apresentadas, outras fontes são utilizadas em pequena escala. Entre elas estão a energia eólica, produzida pelos ventos e a energia solar. Estas fontes de energia apresentam grande vantagem sobre os combustíveis fósseis, uma vez que são renováveis. No entanto, o seu uso depende de aspectos econômicos, tendo se mostrado viáveis para a geração de energia elétrica em regiões que não são assistidas pela rede de distribuição de outras fontes de energia.

22.6.1 Energia eólica

A energia eólica é produzida pela movimentação de hélices pela ação do vento. A energia gerada pode ser utilizada diretamente para bombear água ou mover moinhos, ou ainda para gerar energia elétrica. O uso para bombear água é bastante antigo e conhecido, porém, a geração de energia elétrica só se tornou



Fig. 22.18 Usina eólica da Taíba, CE, que produz 5 MW, é a primeira a ser implantada sobre dunas. Foto: Wobben Windpower.

economicamente viável após o desenvolvimento de rotores e geradores de alta eficiência. Hoje este tipo de energia é aproveitado em várias partes do mundo que apresentam incidência constante de ventos, inclusive no Brasil, que dispõe de usinas em operação no Ceará (Fig. 22.18) e Paraná, além de várias áreas potencialmente favoráveis, uma vez que o custo de energia eólica gerada torna-se competitivo à medida que as melhores possibilidades de aproveitamento hidrelétrico forem se esgotando. É importante ressaltar que, por se tratar de uma fonte limpa de energia e a área ocupada poder ser usada simultaneamente tanto pela agricultura como pela pecuária, sua utilização tem crescido sensivelmente. Em 1990 a capacidade de geração instalada no mundo era da ordem de 2 MW, saltou para 10,2 MW

22.1 Proálcool

Com a primeira crise do petróleo ocorrida no final de 1973, diversos países incentivaram pesquisas para o desenvolvimento de energias alternativas. Dentro de tal cenário, o Brasil criou o que, sem dúvida, tem sido a maior experiência mundial na produção e utilização de energia provinda de combustíveis derivados da biomassa no mundo.

Trata-se de um programa, criado em 1975, cujo objetivo central era substituir parte das importações de petróleo, que comprometiam pesadamente a balança comercial do Brasil, devido ao seu repentino aumento de preços.

Esse programa visava a utilização de álcool (etanol) produzido a partir da cana-de-açúcar em substituição aos combustíveis derivados do petróleo, principalmente a gasolina. Para isso, teve-se que criar uma infra-estrutura de plantio, destilação e distribuição que atendesse a tal objetivo. Paralelamente, o programa exigia, por parte dos fabricantes de veículos automotores, um esforço de desenvolvimento tecnológico na adaptação dos motores movidos a gasolina.

A implantação do programa se daria paulatinamente, primeiramente com a adição de um percentual crescente (até 25%) de álcool à gasolina para, posteriormente, implantarem-se veículos movidos exclusivamente a álcool.

O Proálcool foi sendo implantado com sucesso, apesar da sua inerente complexidade, devido à extensão territorial e a conjunturas políticas internas, sendo que em 1985 cerca de 96% dos automóveis novos eram movidos exclusivamente a álcool.

Apesar do êxito alcançado, a partir de 1986, com o decréscimo dos preços internacionais do petróleo, e paralelo aumento dos preços do açúcar, o álcool combustível perdeu sua competitividade, provocando uma crise no abastecimento interno. Tais fatores levaram a um relativo descrédito popular ao programa, decrescendo sensivelmente a produção de novos veículos movidos a álcool. No entanto, o programa possibilitou expressivo desenvolvimento tecnológico tanto na área de refino como na biotecnologia e cultura da cana-de-açúcar.

Fica evidente que o futuro do Proálcool depende das oscilações do preço do petróleo. No entanto, o fator positivo é a disponibilidade de um programa bem-sucedido, com tecnologia própria, que, além de utilizar uma fonte de energia renovável e menos poluente, quando comparada à energia produzida a partir de combustíveis fósseis, é um fator importante na geração de empregos e desenvolvimento nas áreas rurais.

no final de 1998, sendo a Europa responsável por mais de 60% dessa produção. Na Europa, estima-se que a partir de 2020 cerca de 10% de toda energia elétrica gerada será de origem eólica.

22.6.2. Energia solar

A **energia solar** é aquela aproveitada da incidência de raios solares na superfície terrestre. Pode ser utilizada de forma passiva simplesmente para o aquecimento de água ou mesmo de ambientes, sendo que, nos últimos anos, cada vez mais unidades coletoras de calor podem ser vistas sobre os telhados nas cidades

brasileiras. A energia solar pode também ser aproveitada por meio de **células fotovoltaicas**, que geram uma corrente elétrica capaz de carregar baterias. O custo relativamente elevado dessas células tem caído sensivelmente nos últimos anos, possibilitando sua utilização em áreas que não dispõem de outras formas de energia, a preços que, a longo prazo, tornam-se compensatórios, visto não necessitarem de extensas redes de distribuição. Levando em conta o retorno social que o acesso à energia elétrica propicia, o uso de células fotovoltaicas pode passar a ser um importante meio de promoção social, principalmente para as regiões mais distantes dos centros urbanos.

22.2 Fusão Nuclear

Em contraste com a **fissão nuclear**, que envolve a quebra de átomos pesados como o urânio, a fusão nuclear envolve a combinação de elementos leves como o hidrogênio para a formação de hélio, a exemplo do que ocorre no sol e outras estrelas. A Fig. 22.19 esquematiza a reação provocada na fusão, com a respectiva liberação de energia.

Em um hipotético reator de fusão, dois isótopos de hidrogênio (átomos com diferentes massas devido a diferentes números de nêutrons presentes no núcleo), deutério (D) e trítio (T), são injetados na câmara do reator onde são mantidas as condições necessárias para a fusão (temperatura, tempo, densidade).

Como produto da fusão D-T, 20% da energia liberada é utilizada na formação de hélio, enquanto os outros 80% de energia são liberados em nêutrons.

Para a ocorrência desta fusão, no entanto, é necessária a criação de um ambiente com condições favoráveis: 1) temperatura extremamente elevada (aproximadamente 100 milhões de graus Celsius), 2) elevada pressão de confinamento, criando um plasma, e 3) confinamento do plasma durante um certo tempo de modo a assegurar que a energia liberada pela fusão exceda a energia necessária para manter o material em estado de plasma.

A partir desse sistema, um grama de combustível D-T (de um suprimento combustível de água e lítio) tem a energia equivalente a 45 barris de óleo, sendo que o Deutério pode ser extraído economicamente da água dos oceanos, enquanto o Trítio pode ser produzido em uma reação com lítio em um reator de fusão.

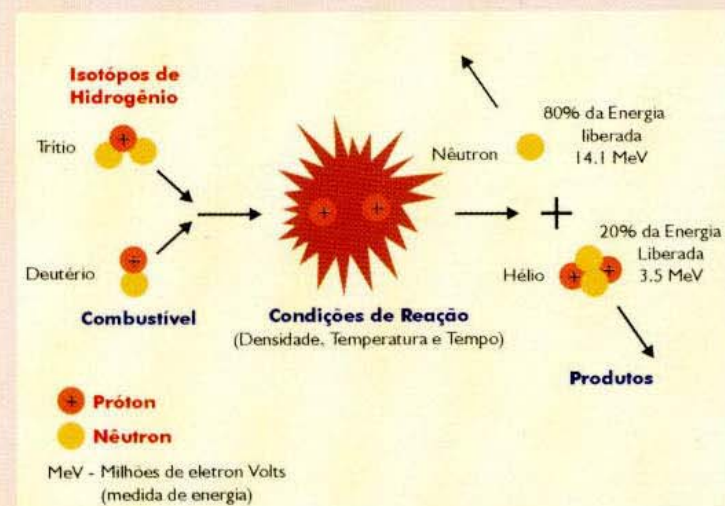


Fig. 22.19 - Esquema da reação de fusão nuclear.

No entanto, para que a fusão nuclear se torne comercialmente viável, as tecnologias de geração de altíssimas temperaturas e pressões necessárias para sua ocorrência devem ser desenvolvidas.

A energia gerada a partir da fusão teria aplicações diversas, tais como a geração de energia elétrica e produção de combustíveis sintéticos

Do ponto de vista ambiental, a fusão nuclear se mostra atraente quando comparada com os combustíveis fósseis ou com a fissão nuclear, pois gera uma quantidade mínima de resíduos além da possibilidade de instalação de usinas próximas às regiões de maior consumo de energia.

22.3 E o Futuro?

Como foi visto neste capítulo, cada uma das alternativas de produção de energia apresenta algum tipo de impacto ao meio ambiente, que não tem sido contabilizado no seu custo. Os combustíveis fósseis apresentam problemas com respeito ao efeito estufa, a alternativa nuclear com a disposição final dos rejeitos radioativos e as barragens com a área inundada e a alteração do regime dos rios. As demais alternativas têm uma aplicação muito localizada. As questões inevitáveis são: 1) haverá energia suficiente para suprir uma população crescente? 2) até quando o planeta suportará a degradação ambiental causada pelas fontes de energia em uso atualmente? Os especialistas que se ocupam em avaliar o comportamento do mercado internacional e o futuro dos recursos energéticos não acreditam que possa haver uma crise energética a curto prazo. Estimam que há reservas de petróleo para mais um século de consumo, além da possibilidade de se implantarem muitas novas usinas nucleares. Paralelamente, o decréscimo de custo das unidades eólicas e fotovoltaicas tem levado a um incremento no uso destas alternativas. Prevêem, também, que em tempo muito menor (talvez 50 anos) já se tenha desenvolvido um recurso energético que substitua o petróleo e que não cause tantos problemas ambientais. Estas suposições explicam, em parte, a relativa estabilidade dos preços dos combustíveis fósseis.

Leituras recomendadas

BUNTERBARTH, G. *Geothermics – an Introduction*. Springer-Verlag, 1984.

DEMETRIO, J. G. A. *Perfis de temperatura na locação de poços tubulares no cristalino do nordeste brasileiro*. São Paulo: Instituto de Geociências - USP, 1998 (tese).

KELLER, E. A. *Environmental Geology*. New York: Macmillan, 1996.

PRESS, F. & SIEVER, R. *Understanding Earth*. 2nd ed. New York: W. H. Freeman, 1998.

RAHN, P.H. *Engineering Geology – an Environmental Approach*. New York: Elsevier, 1986.

SKINNER, B.J. & PORTER, S. C. *The Dynamic Earth: an Introduction to Physical Geology*. New York: John Wiley & Sons, 1995.