

CENTRAIS
TERMELÉTRICASTabela 2.5 As quinze maiores hidrelétricas brasileiras
(agosto de 2009) (continuação)

HIDRELÉTRICAS	RIO	CAPACIDADE INSTALADA (MW)
Japarica	São Francisco	1.500
Ilé	Uruguai	1.450
Marimbondo	Grande	1.340
Água Vermelha	Grande	1.396
Três Irmãos	Tietê	1.292

Lembre-se: conteúdo adicional deste livro pode ser encontrado no site www.manole.com.br/geracaodeenergiaeletrica.

O processo fundamental de funcionamento das centrais termelétricas baseia-se na conversão de *energia térmica* em *energia mecânica* e esta em *energia elétrica*.

A conversão da energia térmica em mecânica se dá através do uso de um fluido que produzirá, em seu processo de expansão, trabalho em turbinas térmicas. O acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina permite a conversão de energia mecânica em elétrica.

A produção da energia térmica pode se dar pela transformação da energia química dos combustíveis através do processo da combustão, ou da energia nuclear dos combustíveis radioativos, com a fissão nuclear. Centrais cuja geração é baseada na combustão são conhecidas como termelétricas; as centrais termelétricas baseadas na fissão nuclear são chamadas de centrais nucleares.

As centrais termelétricas são classificadas de acordo com o método de combustão utilizado:

- a) *Combustão externa*: o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho. Processo usado principalmente nas centrais termelétricas a vapor, onde o combustível aquece o fluido de trabalho (em geral água) em uma caldeira até gerar o vapor que, ao se expandir em uma turbina, produzirá

COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis mais usuais das centrais termelétricas são:

-) Derivados do petróleo.
-) Carvão mineral.
-) Gás natural.
-) Nucleares.
-) Biomassa.

Neste cenário pode ser citado o aproveitamento da energia geotérmica renovável; assim como da energia solar que, além de poder ser diretamente utilizada para geração de energia elétrica, como ocorre no caso dos painéis fotovoltaicos, pode também ser fonte direta de calor para uma usina termelétrica, nas denominadas centrais termossolares. Ainda não existe em operação comercial no Brasil, esse tipo de geração não tratada aqui, mas é descrita com os detalhes compatíveis ao objetivo deste livro, no Capítulo 4, sobre a energia solar.

Nota-se que a maioria desses combustíveis é fóssil (derivados do petróleo, carvão mineral, gás natural e elementos radioativos: urânio, tório, plutônio) e classificada como fonte primária não renovável, devido ao longo tempo necessário para sua reposição pela natureza, comparativamente à velocidade de sua utilização. Os demais recursos energéticos apresentados acima, a energia geotérmica, a solar e a da biomassa (em geral advinda de plantações manejadas ou atividades organizadas de coleta e tratamento, tais como as florestas energéticas, o bagaço de cana-de-açúcar e o lixo urbano), são renováveis.

Os combustíveis não renováveis e os renováveis são enfocados separadamente a seguir, principalmente devido às suas características conflitantes quanto ao aquecimento global e à construção de um modelo sustentável de desenvolvimento para (e pela) humanidade.

Combustíveis Não Renováveis (Fósseis)

Atualmente, a grande maioria dos combustíveis utilizados no mundo fóssil, com participação total do petróleo (primeiro lugar), carvão mi-

total da energia primária ofertada. Essa porcentagem tem apresentado variações ao longo do tempo, mas essas variações não têm sido muito significativas. Interessante notar que, na produção de energia elétrica, o carvão mineral tem sido mais utilizado que o petróleo. No âmbito da energia como um todo, o petróleo aumenta significativamente sua participação devido ao setor de transportes.

Outro aspecto importante a ser considerado é que as reservas mundiais de petróleo, de gás natural e de carvão mineral indicam que a influência dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial ainda pode durar um longo tempo, se não ocorrerem mudanças drásticas motivadas pelos problemas ambientais, dentre os quais se resalta a produção de gases estufa.

O item "Atividades Adicionais: Levantamento de Informações e Dados", apresentado no final deste capítulo, apresenta informações sobre o assunto e propõe levantamentos na Matriz Energética Mundial e de dados internacionais dos setores do petróleo, gás natural e carvão mineral, que permitirão ao leitor conhecimento mais detalhado e atualizado das porcentagens de participação na matriz e das referidas reservas.

Todas as previsões atuais de evolução da matriz energética mundial, mesmo nos cenários mais otimistas para o desenvolvimento sustentável, que preconiza aumento da participação das fontes renováveis, indicam que os combustíveis fósseis ainda preencherão uma porcentagem significativa dessa matriz neste século XXI.

Nesse contexto, há considerações de que uma transição maciça para as fontes primárias renováveis, se e quando ocorrer, terá como ponte o gás natural.

Essas perspectivas vêm sendo aventadas internacionalmente no âmbito dos estudos do aquecimento global, efetuados pelo International Panel on Climate Change (IPCC), já há cerca de duas décadas, embora modificações efetivas não tenham ocorrido ou ocorreram de forma muito tímida e desordenada. Para maiores informações sobre esse assunto, sugere-se acompanhamento das ações internacionais relativas ao aquecimento global, por exemplo, a partir do Protocolo de Kyoto, dispositivos em diversas referências e sites internacionais, uma vez que o assunto não é o objetivo deste livro, mas deve ser de conhecimento de quem estuda a geração elétrica, que tem grande influência no aqueci-

Nesse sentido, há, obviamente, correntes associadas às indústrias dos combustíveis fósseis que chegam a propor que a transição para fontes renováveis não precisaria ser tão significativa ou poderia ser balanceada com tecnologias já desenvolvidas ou em desenvolvimento para tornar menos deletérios ambientalmente os efeitos dos combustíveis fósseis, tais como a captura do CO₂ e seu armazenamento (em cavernas ou em poços já utilizados de combustível fóssil); a utilização de reatores nucleares cuja reação em cadeia se extingue pelo próprio processo no caso de acidente de alto grau e com resíduos finais menos perigosos. Certamente o efetivo papel dessas tecnologias e seu desempenho e impacto ao longo do tempo ainda não estão provados ou mesmo claros. Tal postura vem colocar mais confusão no cenário do aquecimento global, ao mesmo tempo em que as recentes alterações climáticas vêm indicando a urgência de decisões concretas em termos globais.

No Brasil, o petróleo e o gás combustível (em escala bem menor) apresentam uma expressiva influência na matriz energética, sobretudo no setor de transportes, no qual, ao contrário do restante do mundo, há expressiva participação da biomassa renovável (alcool, biodiesel). Na geração de eletricidade, esta participação do petróleo e do gás natural tem aumentado de forma significativa, principalmente como energia de reserva, com vistas a aumentar a segurança (de suprimento) do sistema elétrico.

As recentes descobertas de enormes reservas de petróleo e gás natural em grandes profundidades marítimas na camada de pré-sal (profundidades da ordem de 7.000 m) na costa da região sudeste brasileira vieram ressaltar contradições nas políticas energéticas recentes do país, que, na realidade, não apresentou um planejamento energético digno desse nome, praticamente em nenhum momento da história mais recente (não confundir planejamento energético nacional com o planejamento setorial da eletricidade e o planejamento estratégico da Petrobrás): enquanto há poucos anos se colocou (ingenuamente?) o Brasil como a grande esperança mundial das fontes renováveis, por causa do uso de biomassa, hoje (alguns anos depois) a grande esperança do país está nos combustíveis fósseis, ou seja, em plena contramão da solução mais adequada para os problemas do aquecimento global e para a busca de um modelo

O carvão mineral não tem tido grande participação no cenário energético brasileiro, por motivos que serão enfocados adiante neste capítulo.

Um panorama sucinto da situação atual desses combustíveis é apresentado a seguir, enfatizando-se as condições do Brasil.

Deve-se acrescentar que no item "Atividades Adicionais: Levantamentos de Informações e Dados", no final deste capítulo, são apresentadas informações mais específicas sobre o assunto, assim como são sugeridos levantamentos no Balanço Energético Nacional, na Matriz Energética Brasileira e em dados dos setores do petróleo, gás natural, carvão mineral e biomassa, que conduzirão o leitor a informações e dados sempre mais atualizados relativos ao nosso país.

Petróleo e seus derivados

O petróleo, também conhecido como óleo cru, é encontrado na maioria das vezes em depósitos subterrâneos dos quais é retirado através de poços. É formado basicamente por hidrocarbonetos, de fórmula geral C_nH_m, de onde saem por destilação nas refinarias de petróleo seus inúmeros derivados. Sua utilização como combustível implica danos ambientais atmosféricos, pois emite óxidos de enxofre, nitrogênio e carbono, contribuindo para o efeito estufa. Além de outros danos socioambientais relacionados a vazamentos, tanto de petroleiros como de oleodutos.

O primeiro poço para utilização comercial de petróleo foi perfurado em 1859, nos Estados Unidos. O querosene extraído destinava-se basicamente à iluminação, porém, com o advento do motor a diesel e com a aceleração da indústria automobilística, o mineral passou a ocupar um papel de fundamental importância no mundo.

Hoje, o petróleo é o principal componente da matriz energética mundial, pois apresenta baixo custo (sob o ponto de vista econômico), comparativamente às demais alternativas energéticas e uma ampla gama de utilização em diversos setores. Seu uso, no entanto, apresenta problemas como custos decorrentes de sua importação, danos ambientais e vulnerabilidade estratégica dos países desenvolvidos em relação aos do Oriente Médio, onde se encontram as maiores reservas de petróleo do mundo. Essa vulnerabilidade foi comprovada historicamente com as crises do petróleo

de 1979, quando o preço do barril passou para US\$ 35,00, retornando, após a crise, para o patamar de aproximadamente US\$ 15,00. Tais crises e, mais recentemente, a preocupação com o meio ambiente, sobretudo com o aquecimento global associado à emissão dos gases estufa (o CO₂ é o carro-chefe), estimularam a busca de alternativas energéticas que vêm sendo estudadas e aperfeiçoadas.

Com a grande maioria de todas as reservas mundiais de petróleo, os grandes mercados exportadores são o Oriente Médio e os países da Federação Russa (antiga União Soviética). Entre os principais mercados importadores se destacam os Estados Unidos, o Japão, a China, a Índia e a Coreia. Muitos países com alta demanda por determinado derivado têm de importar o petróleo bruto, mas ocorre o excedente de outros derivados, que é exportado, fazendo com que tais países sejam ao mesmo tempo importadores e exportadores de derivados do petróleo.

Mesmo com todos os problemas associados ao seu uso, o petróleo ainda deve ser o principal componente da matriz energética mundial por um longo período, pois seus custos são mais baixos que os dos combustíveis concorrentes e suas reservas têm aumentado sistematicamente desde o começo de sua utilização comercial.

Em 2007, a utilização de petróleo era direcionada principalmente para o setor de transportes (61,2%). A indústria consumiu 9,2% e houve um uso não energético de 16,8%, restando para os outros setores, incluindo a energia elétrica, um total de 12,8% do consumo mundial de petróleo (3.532 Mtep).

No setor elétrico brasileiro o óleo diesel é utilizado apenas para geração em locais distantes e de difícil acesso para a rede elétrica. Sua substituição na geração de eletricidade é bastante viável, pois já se apresentam excelentes alternativas, como o gás natural. No setor de transportes, em que a predominância do petróleo é muito forte, há uma série de desenvolvimentos e pesquisas de alternativas baseadas na utilização de motores elétricos, na tecnologia do hidrogênio, de álcool combustível e de soluções híbridas dessas técnicas com derivados do petróleo. Diversas dessas soluções têm sido introduzidas no setor de transportes e estudos relacionados com a denominada mobilidade sustentável indicam que elas deverão cumprir papel importante nas próximas décadas, principal-

No Brasil, as reservas de petróleo têm expandido fortemente nas duas últimas décadas, crescendo a taxas anuais de 8,7% e 11% entre 1970 e 1990. Grande parte desse potencial se localiza na plataforma continental, particularmente na Bacia de Campos; outra parte significativa se encontra em águas profundas. Apesar de a exploração nessas águas envolver custos cinco vezes superiores aos atuais na plataforma continental, a produção é cerca de dez vezes maior, o que acarreta redução efetiva dos custos unitários desses campos.

Mais recentemente, como já dito, foi anunciada a descoberta de enormes reservas de petróleo e gás natural em águas muito profundas (cerca de 7.000 m de profundidade) na camada de pré-sal na costa sudeste brasileira. Isso coloca o Brasil como país bastante relevante no cenário do petróleo, embora ainda seja necessário muito trabalho para se conhecer melhor as reservas e para iniciar a produção. Por outro lado, ainda não está claro quais políticas o país adotará com relação a este triunfo no momento atual de desenvolvimento da sociedade, uma vez passado o momento atual de grandes expectativas (como citado anteriormente, alguns anos atrás houve expectativas semelhantes, com relação ao uso de biomassa no setor de transportes). O que parece ser mais equilibrado e maduro é a adoção de posturas pró-ativas (e mesmo de liderança) na busca de um modelo sustentável de desenvolvimento em termos mundiais, uma vez que o país, com grandes recursos energéticos, tanto fósseis como renováveis, pode passar a ter um peso praticamente sem comparação nessa discussão.

No Brasil, a aplicação da tecnologia do petróleo na geração termelétrica se dá através dos seus derivados. Os principais são a gasolina, o óleo diesel e o óleo combustível.

A geração elétrica com base no diesel ocorre principalmente em áreas rurais e mesmo urbanas em regiões isoladas, como a Amazônia e o centro-oeste. Esse tipo de geração tem apresentado grandes problemas associados à manutenção dos equipamentos e à logística de suprimento do combustível e acredita-se que deverá ser desalojada com a entrada do gás natural, o mesmo ocorrendo com a geração a gasolina. Quanto a esse assunto, ver também o Capítulo 6, sobre sistemas híbridos com fontes renováveis e minirredes para alimentação elétrica de comunidades isoladas. Um aspecto interessante, que faz com que pelo menos em

é sua utilização como energia de *back up* em praticamente todas as unidades de consumo de médio ou grande porte. Por exemplo, hospitais, shopping centers, subestações elétricas, indústrias e prédios confiam na geração a diesel como reserva para utilização em casos de emergência ou, às vezes, na ponta de carga, quando a tarifa elétrica é maior.

Carvão mineral

Apesar de já conhecido e utilizado na China em 1100 a.C., o carvão mineral só passou a ser difundido como fonte de energia para as máquinas a vapor com o advento da Revolução Industrial no século XVII. Sua utilização foi necessária devido à crise da madeira combustível no século XVI.

Hoje, ele ocupa a segunda posição na matriz energética mundial devido ao seu baixo custo, que varia de região para região, em função principalmente do peso que o transporte tem no seu custo final. Por se tratar de um combustível sólido, o carvão apresenta maiores custos de transporte que o petróleo, que é líquido e pode ser transportado através de oleodutos. Essa diferença de custos e a característica rígida da produção de carvão fazem com que apenas uma pequena parcela da produção mundial seja comercializada internacionalmente. Os principais mercados exportadores, segundo dados do IEA (referidos a 2007), são a Austrália (31,8%) e a Indonésia (25,6%) e os principais importadores, o Japão e a Coreia.

O carvão mineral é altamente poluente e grande parte do seu consumo mundial é voltado para a geração de energia termelétrica. Embora as emissões de NO_x e SO_x possam ser reduzidas, a grande quantidade de CO₂ emitida traz enormes impactos sobre o meio ambiente, ao contrário da biomassa, que absorve o CO₂ emitido. Assim evidenciam-se as vantagens ambientais de substituir tal combustível na geração de energia elétrica. Por outro lado, foram desenvolvidas técnicas para obter melhor desempenho das termelétricas a carvão, tanto do ponto de vista de eficiência, como de diminuição das emissões, podendo-se citar a queima em leito fluidizado e a gaseificação do carvão.

No Brasil, o carvão mineral é encontrado em cinco grandes regiões: Alto Amazonas, Rio Fresco, Tocantins-Araguaia, Piauí Ocidental e Brasil

Marcelo...

atual, economicamente interessante à exploração. No estado do Rio Grande do Sul encontra-se a maioria dos recursos carboníferos identificados na região do Brasil Meridional (Sul).

O carvão mineral tem tido uma participação bastante reduzida na geração de energia elétrica no país, devido a sua pouca ocorrência, às características "pobres" do carvão disponível (baixo poder calorífico) e aos impactos ambientais negativos (poluição atmosférica). As usinas elétricas a carvão natural significativas existentes no Brasil se localizam no Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Gás natural

Basicamente composto pelo metano (seu principal componente), etano, propano, butano e outros mais pesados, o gás natural é o nome dado a uma mistura de hidrocarbonetos e impurezas. Estas e os contaminantes (dióxido de carbono e gás sulfídrico) são removidos antes de sua utilização comercial.

O mercado mundial de gás natural (GN) evoluiu lentamente até os anos de 1950, apresentando um rápido crescimento a partir da década de 60 por motivos econômicos e ambientais confirmados pelas crises do petróleo de 1973 e 1979 quando o GN se mostrou um ótimo substituto do petróleo em diversas aplicações.

O gás natural é hoje o terceiro combustível na matriz energética mundial e pode, com exceção do querosene de aviação, substituir qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso. Embora seja uma fonte não renovável, apresenta vantagens ambientais relevantes quando comparado ao petróleo e ao carvão mineral, pois sua composição faz com que seja muito pouco poluente, restringindo seus efeitos basicamente à emissão de CO₂. O maior entrave à sua utilização é o alto custo inicial da construção da malha de gasodutos, que o encarece frente aos preços do petróleo e do carvão mineral, por isso sua substituição vem ocorrendo moderadamente. Segundo dados do IEA (relativos a 2007), o GN é responsável por 20,9% de toda a energia elétrica gerada mundialmente, parcela maior que a geração hidráulica, que participa com 15,6%. A tendência é de aumento desse número, seja por questões ambientais, seja para diminui-

De acordo com o IEA (2007), Estados Unidos, ex-URSS e Canadá respondem por 44,5% da produção mundial de GN, sendo os maiores mercados importadores o Japão, os Estados Unidos e a Alemanha, enquanto os maiores exportadores são Rússia, Noruega e Canadá.

No Brasil, o crescimento do consumo de gás natural parece ter como fatores limitantes os investimentos necessários à sua produção e à pequena rede de distribuição existente. Sua aplicação atual mais imediata tem a ver com o uso do gás da Bolívia, em Cuiabá, e ao longo do gasoduto para São Paulo, além do uso do gás da Argentina, via interconexão elétrica, e aproveitamento do gás natural de Urucu, na região Amazônica.

Um aspecto importante considerado na utilização do gás natural é a sua aplicação em projetos de cogeração, com produção de eletricidade e vapor, fazendo com que a eficiência do uso do GN aumente significativamente em comparação com a eficiência muito baixa para a geração de energia elétrica.

O primeiro grande mercado de interesse e para onde certamente está se encaminhando a expansão do gás natural é o mercado industrial para uso em sistemas de cogeração. Isso depende, no entanto, da instalação da malha de distribuição de gás, ainda em fase de evolução. A medida que o uso do gás natural como combustível industrial de maior interesse econômico e mais fácil penetração no mercado começar a se aproximar de seu limite, aumentará o interesse na comercialização dos demais usos do gás.

ombustíveis nucleares

A energia nuclear aproveita a propriedade de certos isótopos de urânio de se dividirem, liberando grande quantidade de energia térmica, em um processo conhecido como fissão nuclear.

A energia atômica também pode ser gerada através de um processo conhecido como fusão nuclear, baseado não na quebra, mas na junção de núcleos atômicos. Embora a quantidade de energia liberada seja muito alta, esse processo ainda está em fase de evolução e certamente demandará tempo até que se atinja um avanço tecnológico que permita seu aproveitamento comercial.

O urânio se apresenta, na natureza, associado a outros elementos, tendo valor comercial dentro da faixa de 500 a 4.000 ppm. Para sua uti-

lização, que demanda tecnologia sofisticada. O conhecimento de tal processo é estratégico e hoje os grandes mercados de enriquecimento de urânio são Estados Unidos, Europa Ocidental e Japão.

Na década de 1970, quando se projetaram estimativas de crescimento muito maiores que as realmente alcançadas hoje, a tecnologia nuclear foi vista como uma das principais alternativas para a geração de energia elétrica. No entanto, embora não haja emissão aérea de poluentes, os resíduos nucleares mantêm a produção de radioatividade de forma quase permanente, representando risco constante ao meio ambiente. Além disso, em comparação com a imagem social de outras alternativas energéticas, a das usinas nucleares é muito ruim. Nenhuma outra forma de geração enfrenta tantas pressões populares contra sua implantação, devido principalmente à associação imediata que as pessoas fazem à bomba atômica e ao risco de vida e de doenças mortais ao longo do tempo, em caso de um acidente, o que foi confirmado pelo acidente nuclear ocorrido na usina russa de Chernobyl, em abril de 1986.

Tais características fizeram com que o crescimento esperado da construção de usinas nucleares, na década de 1970, frustrasse as expectativas, assim, hoje, a energia nuclear ocupa o quarto lugar na matriz energética mundial, embora esteja na frente da energia hidrelétrica.

Aproximadamente 75% da produção mundial de urânio é objeto de trocas internacionais. A pequena taxa de crescimento dos programas nucleares fez com que houvesse um excedente do produto, que hoje apresenta baixos preços. Além disso, o custo do urânio tem pouca influência no custo do kWh da energia nuclear e existe a dependência com relação aos países que dominam a tecnologia para seu enriquecimento.

No Brasil houve um programa nuclear com previsão de diversas usinas, iniciado na década de 1960, mas que não foi levado a cabo. Estão atualmente em operação as usinas Angra I (657 MW) e Angra II (1.350 MW). Recentemente se decidiu pelo término da usina Angra III e têm sido veiculadas notícias sobre a retomada de algum programa nuclear.

Biomassa Renovável e Energia Geotérmica

A biomassa é aproveitada energeticamente através do uso do etanol, bagaço de cana, carvão vegetal, óleo vegetal, lenha e outros resíduos

crise da madeira combustível na Inglaterra, ela vem sendo substituída pelos combustíveis fósseis.

Fonte de energia renovável (quando manejada adequadamente), a biomassa apresenta vantagens ambientais inexistentes em qualquer combustível fóssil. Como não emite óxidos de nitrogênio e enxofre, e o CO₂ lançado na atmosfera durante a queima é absorvido na fotossíntese, apresenta balanço zero de emissões. Tais características devem, futuramente, reverter a tendência de troca de combustíveis, e a biomassa vai retomar espaços ocupados pelo petróleo e pelo carvão mineral.

Embora ainda não disponha de uma avaliação que permita quantificar confiavelmente sua participação atual na matriz energética mundial, a biomassa tem maior participação na matriz de países subdesenvolvidos. Nos países desenvolvidos, em meio a um cenário de preservação ambiental, apresenta importância crescente como fonte de energia renovável.

O crescimento do uso da biomassa na produção de energia tem como principal fator limitante o enfoque meramente econômico, segundo o qual os custos dos combustíveis fósseis são bem menores. A inclusão, nesta avaliação, de fatores associados ao aquecimento global e geração de empregos principalmente nos países não desenvolvidos, por exemplo, altera a comparação em favor da biomassa. Contra seu uso há, no entanto, outro argumento bastante debatido que é o fato desta concorrer com a produção de alimentos, tanto física quanto economicamente.

No Brasil, o uso mais importante da biomassa se relaciona com o desenvolvimento da frota de veículos a álcool (de cana-de-açúcar), que criou uma alternativa mais promissora e mais adequada ambientalmente que os derivados do petróleo. O uso da biomassa para produção de energia elétrica se apresenta mais promissor com os resíduos da cana-de-açúcar, biomassa florestal e, mais recentemente, o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (lixo).

O bagaço de cana é o resíduo sólido proveniente da moagem ou diuão da cana-de-açúcar, após a extração da sacarose. Como os resíduos de cana apresentam baixa densidade energética, devem ser aproveitados em local próximo à usina. As indústrias do setor sucroalcooleiro, que em produção sazonal, utilizam vapor na produção e, simultaneamente, a geração de eletricidade, atendendo às necessidades da própria usina e gerando excedentes durante a safra. Diante desse quadro, a geração de

mentação da energia hidrelétrica e a projetos de cogeração, com eventual venda de excedentes para o setor elétrico.

No Brasil, existem florestas energéticas implantadas para o suprimento das indústrias siderúrgicas e também das fábricas de papel e celulose, colocando o país na vanguarda do conhecimento mundial em tecnologia florestal.

A energia elétrica também pode ser obtida a partir da gasificação da madeira proveniente de plantações de espécies vegetais de curta rotação, próprias para fins energéticos, em conjunto com a tecnologia de turbina a gás. O Brasil ainda não dispõe desta tecnologia em termos comerciais.

Devido à sua importância no cenário da aplicação da biomassa para geração de energia elétrica, apresenta-se a seguir um cenário geral da indústria da cana-de-açúcar, depois enfoca-se a energia geotérmica.

Indústria da cana-de-açúcar: cenário geral

A cana-de-açúcar, hoje, é uma importante fonte financeira nas áreas rurais do Brasil, cobrindo milhões de hectares de terra e produzindo centenas de milhões de toneladas de cana, que são industrializadas para produção de açúcar, álcool e energia (elétrica e térmica) para uso próprio e (em muitos casos) para venda no mercado energético.

De um ponto de vista geral, a indústria de cana-de-açúcar requer muitas ações específicas para evitar práticas que levam à degradação socioambiental, tais como o uso extensivo de áreas agrícolas, técnicas de monocultura, uso intensivo de fertilizantes e pesticidas, alto consumo de água, queimadas durante a colheita e emprego de baixa qualidade. Para superar tais problemas do modelo convencional de agronegócio, a evolução da indústria de cana no Brasil se baseou na adoção de métodos avançados de gestão e ênfase à pesquisa e desenvolvimento, o que conduziu ao cenário atual, no qual a maioria destes problemas foi resolvida ou, ao menos, tem sua solução direcionada.

Características básicas da indústria de cana-de-açúcar no Brasil

Para entender melhor essa indústria em particular, é importante enfatizar suas principais atividades. Muitas delas se relacionam ao gerenciamento da produção de cana-de-açúcar, por exemplo: aquisição da terra

conservação convencional do solo (preparação mecânica); plantação (manual); aplicação de agroquímicos; irrigação; colheita (queima e corte manual ou colheita mecanizada); rotação da plantação.

Outras atividades se relacionam especificamente aos principais produtos da indústria. Elas são: produção industrial de açúcar; produção industrial de álcool; produção de energia; transporte para os locais de consumo (diferente para cada tipo de produto) e usos finais do produto (estas atividades embora ocorram fora dos limites da indústria, são muito importantes, uma vez que estabelecem as relações dos produtos da indústria com os mercados).

Dois estágios básicos comuns das produções industriais de açúcar e álcool são a preparação da cana-de-açúcar (lavagem) e a moagem (extração do suco).

Produtos da moagem são o suco, a torta resultante da filtragem (*filter cake*) e o bagaço. A torta é usada como fertilizante e o bagaço é queimado para produzir eletricidade e vapor em usinas de cogeração. O suco segue para os processos industriais: tratamento (decañtation), fermentação e, então, para a produção de açúcar ou produção de álcool por meio da destilação.

A Figura 3.3 apresenta um diagrama dos principais estágios e atividades da indústria de cana-de-açúcar.

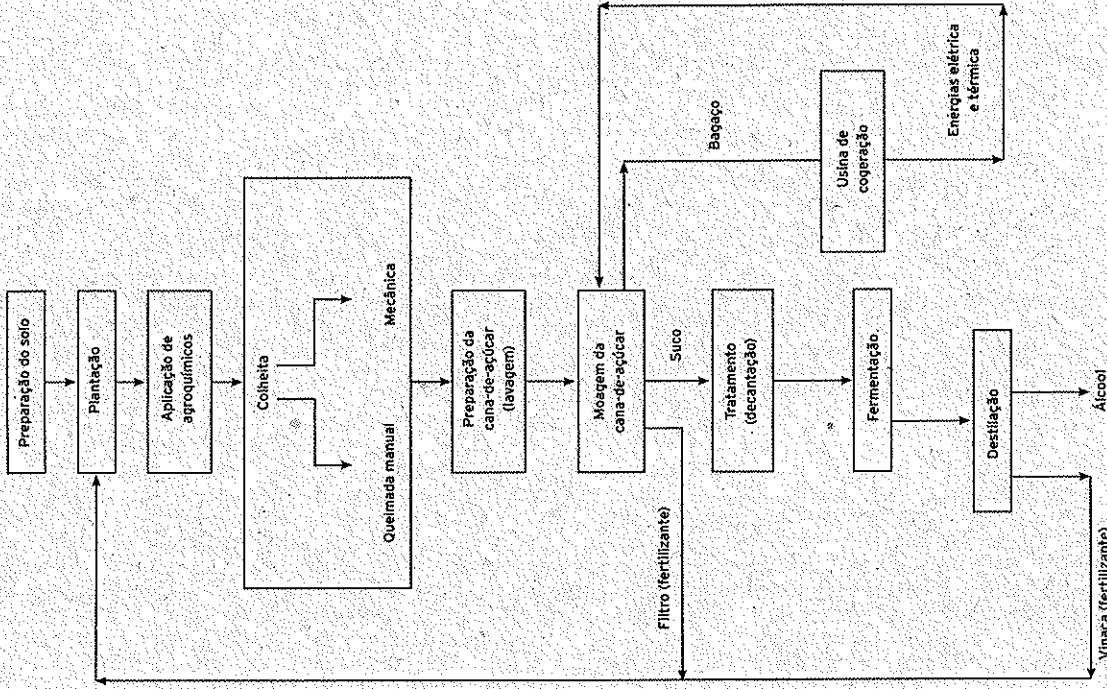
A indústria da cana-de-açúcar no Brasil apresenta ainda alguns aspectos peculiares, que influenciam significativamente sua gestão. Os principais são: a característica sazonal da indústria (a produção ocorre usualmente de maio a novembro); as grandes interfaces ambientais e sociais e os mercados bastante flutuantes de seus produtos.

As características sazonais influenciam o desempenho da indústria como um todo. Os aspectos ambientais e sociais são de fundamental importância para a indústria e a sustentabilidade e serão enfocados especificamente a seguir.

A influência dos mercados é muito importante para a gestão da indústria e está associada aos seus três principais produtos: açúcar, álcool e energia (térmica e elétrica).

Principais produtos da indústria e respectivos mercados

O Brasil é um dos mais importantes atores do mercado mundial de



O mercado do álcool também é de grande importância para a indústria da cana-de-açúcar e para o país, em razão de sua utilização no setor de transportes com vistas à minoração da poluição atmosférica, por meio dos veículos a álcool ou bicombustível. O cenário mundial atual acena com grande aumento da utilização da biomassa para produção de combustíveis para a frota veicular e o álcool produzido da cana-de-açúcar, como no Brasil, é visto como um ator de peso no mesmo cenário. Mas, ao contrário do que ocorre internamente no país, nesse momento (uma vez que ainda não está muito clara a influência da descoberta de petróleo gás natural do pré-sal no mercado automotivo), as perspectivas de aumento do mercado mundial ainda não podem ser claramente estabelecidas. Ou seja, o mercado do álcool também apresenta características não definitivas que podem ser associadas a riscos econômicos.

O mercado de energia elétrica e térmica para as usinas sucroalcooleiras se fortaleceu apenas após a abertura do setor elétrico. Antes disso, embora um grande número de usinas usasse o bagaço como combustível para uso interno, não havia atratividade econômica para venda da energia excedente. Então, também não havia interesse dos usineiros em investir para aumentar sua produção energética. Na medida em que as tarifas de venda de energia (elétrica e térmica) foram se tornando atraentes, as usinas passaram a ter uma nova opção mercadológica, a ser inserida em seu complexo processo de gestão (uma vez que há produtos básicos extremamente dependentes de políticas governamentais para o setor de transportes e sujeitos às expressivas variações do mercado internacional *le commodities*): a venda direta de energia produzida com utilização do bagaço, um resíduo do processo como um todo, cujos mercados (para energia elétrica e energia térmica) também apresentam forte dependência de políticas governamentais. Tais mercados, como já delineado, apresentam ainda muitas incertezas e indefinições, complicando a gestão da indústria da cana-de-açúcar. De qualquer forma, existem muitos estudos e planos que consideram diferentes tecnologias para aumento da produção de energia, cada um com condições específicas de viabilidade. Do ponto de vista prático, no entanto, graças a incentivos governamentais, através do Proinfa e leilões específicos de energia elétrica que enfocam o uso de biomassa, uma quantia razoável de MW foi e vai sendo adicionada ao sistema elétrico; mas é uma quantia ainda pequena quando comparada, às diversas perspectivas visualizadas, se a aplicação das tecnolo-

A Figura 3.4 apresenta uma visão geral da indústria de cana-de-açúcar e seus principais mercados.

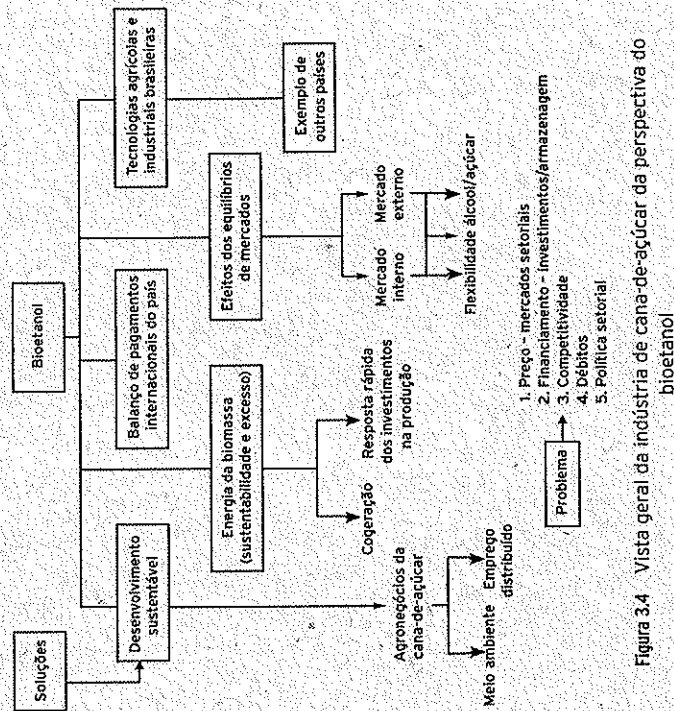


Figura 3.4 Vista geral da indústria de cana-de-açúcar da perspectiva do bioetanol

O cenário das tecnologias para produção de energia das usinas sucroalcooleiras

Atualmente, o bagaço de cana-de-açúcar é queimado em centrais de cogeração para produzir energia térmica e energia elétrica, como é mostrado na Figura 3.5.

Na maioria dos casos, historicamente, a energia elétrica e a energia térmica produzidas eram utilizadas na própria indústria, em grande parte no processo da moenda. Em algumas situações, a energia excedente era vendida, mas a baixo preço. Contudo, com as modificações do setor elétrico brasileiro a partir de 1995, a venda do excesso à rede passou a ser

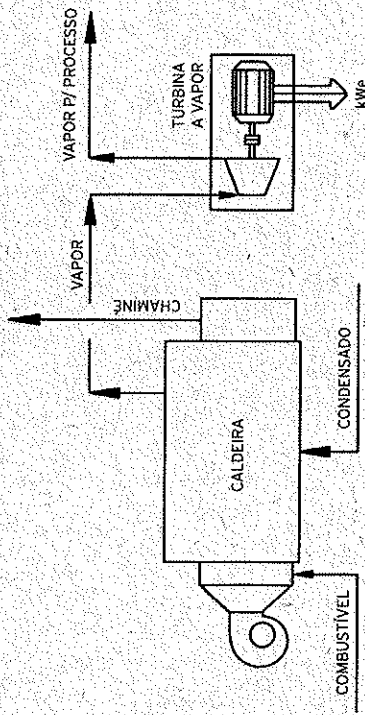


Figura 3.5 Configuração em cogeração

O modo mais simples de obtenção de mais energia é através do aumento da pressão e temperatura máximas do ciclo a vapor. Para isso seria necessário um determinado investimento, o qual teria que ser recuperado ao longo da vida operativa da usina para que a modificação fosse viabilizada economicamente.

Na avaliação das perspectivas de aumento da geração de energia pelas usinas, no entanto, outras alternativas e metodologias vêm sendo consideradas, tais como: produção de energia durante a entressafra; utilização de configuração de ciclo combinado; queima adicional de palhas e pontas e outros resíduos da colheita; gaseificação do bagaço.

A produção de energia durante o período de entressafra a partir do bagaço de cana requer o desenvolvimento de tecnologias econômicas e confiáveis para armazenamento e tratamento do bagaço e, certamente, não será atrativa num sistema eminentemente hidrelétrico, no qual o período de chuvas praticamente coincide com a entressafra, que é o que ocorre nas regiões onde se localizam predominantemente as usinas de cana-de-açúcar. O fato de a colheita se dar no período de poucas águas, proporciona uma complementação entre a energia hídrica e a do setor sucroalcooleiro. Isso fará com que a venda de energia excedente das usinas de cana-de-açúcar na entressafra dificilmente se torne viável do ponto de vista econômico (praticamente não haverá retorno da venda de eletrici-

A configuração a Ciclo Combinado, como apresentada na Figura 3.6, poderia utilizar gás natural comprado de empresas do setor de petróleo e gás ou obtido do próprio bagaço, dependendo da evolução das pesquisas voltadas à gaseificação deste. Mas isso deve ser analisado com muito cuidado, considerando não só o mercado de energia elétrica, mas também o de energia térmica, uma vez que o rendimento dos ciclos térmicos é muito baixo para produção de energia elétrica e a utilização de cogeração é praticamente uma obrigação do ponto de vista de eficiência energética.

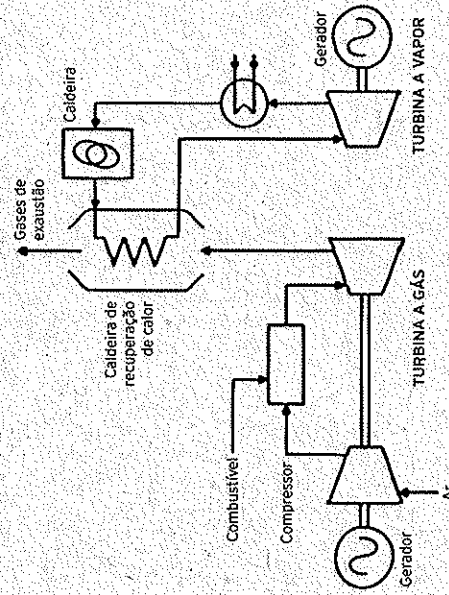


Figura 3.6 Esquema de Ciclo Combinado

A queima de palhas, pontas e outros resíduos da colheita, além do bagaço, pode causar um aumento sensível no potencial de produção de energia do setor sucroalcooleiro. Mas isso depende largamente da taxa de introdução da colheita mecanizada, em vez da queima seguida da colheita manual. Essa taxa vem mostrando tendência a crescer principalmente pelas restrições cada vez mais sérias que vêm sendo impostas às queimadas pelos municípios afetados por estas no que se refere à poluição atmosférica. Nesse caso, deve-se considerar o outro lado da questão:

da qual a colheita é parte fundamental de renda. Essa é uma questão social muito importante no cenário da indústria de cana-de-açúcar.

A gaseificação do bagaço tem sido desenvolvida em projetos piloto e é considerada como possível, num futuro não longínquo, com base nos resultados já alcançados quanto a gaseificação do carvão mineral e da madeira.

É importante citar que na mesma medida em que as tecnologias permitem maior produção de energia, maiores serão os custos. Assim, mesmo que as referidas alternativas e tecnologias fiquem completamente disponíveis, uma avaliação detalhada que considere cuidadosamente os preços de mercado da energia elétrica e da energia térmica será fundamental para garantir a viabilidade econômica da alternativa e/ou tecnologia.

Energia geotérmica

Muitos anos atrás, cientistas reconheceram que o calor oriundo do subsolo terrestre apresentava um bom potencial para substituir os combustíveis fósseis na geração de eletricidade. Na realidade, o uso dessa energia para fins não elétricos, como exemplo: cozimento de alimentos, higiene pessoal, usos medicinais já vem de longa data, ou melhor desde a pré-história.

Os primeiros projetos de aproveitamento da energia geotérmica para geração de eletricidade foram construídos em Lardarello, Itália, em 1904, e em Wairakei, Nova Zelândia, em 1950. O projeto Geysers, Califórnia, foi o primeiro deste tipo nos Estados Unidos. Com uma potência instalada de 2.800 MW, o Campo de Geysers é o mais desenvolvido do mundo. A partir de 1960, pesquisas e desenvolvimentos introduziram várias tecnologias que permitiram aumentar a atratividade econômica desta fonte de energia.

Podem ser citados os seguintes países com potencial de energia geotérmica: Itália, Islândia, Estados Unidos, México, Filipinas, Nova Zelândia, Japão, Turquia, Rússia, China, França, Indonésia, El Salvador, Kenya e Nicarágua. São, em geral, locais próximos a vulcões e sujeitos a abalos sísmicos.

Quando disponível em elevadas temperaturas, o recurso geotérmico é utilizado principalmente para produzir eletricidade. O vapor a alta temperatura e alta pressão aciona uma turbina a vapor acoplada ao gerador

Há várias regiões no mundo com potencial de energia geotérmica para geração de eletricidade, na forma de vapor e água quente (150°C - 200°C), disponíveis em rochas superficiais. São os chamados recursos de elevadíssima entalpia.

Em algumas regiões onde não há reservatório no subsolo, máquinas bombeiam água fria para dentro das rochas quentes (que são aquecidas pelas proximidades com os magmas). A água quente é retirada via tubulação e usada nas usinas de geração de energia elétrica.

A energia geotérmica oferece várias vantagens como: reduzido impacto ambiental comparado às demais fontes, a área afetada é limitada; é uma energia renovável (com um gerenciamento adequado); o seu uso em maior escala pode deslocar uma parte das fontes fósseis. Uma característica especial que a diferencia de outras fontes renováveis é que não é afetada pelas condições climáticas, tais como a solar, a eólica e a hidráulica.

Quanto aos impactos ambientais, os mais significativos e que são relatados são: poluição sonora durante a perfuração do poço e disposição do fluido retirado; rebaixamento do solo. Os gases não condensados e a água condensada possuem alguns poluentes como gás carbônico, dióxido de enxofre, metano (no caso do gás) e sílica, metais pesados, sódio e potássio (no caso da água). Atualmente, quase todos estes elementos são reinjetados.

No Brasil, não há locais adequados para utilização da energia geotérmica. Onde ela existe, é em baixa temperatura, permitindo apenas uso de águas termais para fins medicinais e de lazer. Maiores detalhes sobre as tecnologias aplicadas ao uso da energia geotérmica para geração de energia são apresentados a seguir neste mesmo capítulo.

ESQUEMAS, PRINCIPAIS TIPOS E CONFIGURAÇÕES

A seguir são apresentados, de forma sucinta, os principais tipos de centrais termelétricas: centrais a diesel, centrais a vapor (não nucleares), centrais nucleares, centrais a gás e centrais geotérmicas. Estas últimas serão tratadas em separado devido a suas características específicas. Serão também destacadas as tecnologias mais recentes, que buscam maior eficiência energética e melhor desempenho ambiental: os ciclos

do carvão mineral e da biomassa. Como serão tratadas à parte no capítulo dedicado às novas tecnologias renováveis, as centrais termossolares não são aqui apresentadas.

Centrais a Diesel

Muito usadas em potências até 40 MW, as centrais a diesel para alimentação de sistemas isolados têm uso disseminado em regiões longínquas sem outra fonte de geração (Amazônia, Rondônia etc.)

Elas apresentam, no entanto, limitações relacionadas com potência, ruído e vibração, além de problemas como dificuldade de aquisição de peças de reposição e seu transporte, assim como, principalmente nos locais distantes, os altos custos do combustível. Suas vantagens são a rápida entrada em carga, a simplicidade de operação e o fácil plano de manutenção.

A Figura 3.7 apresenta o esquema de uma central a diesel.

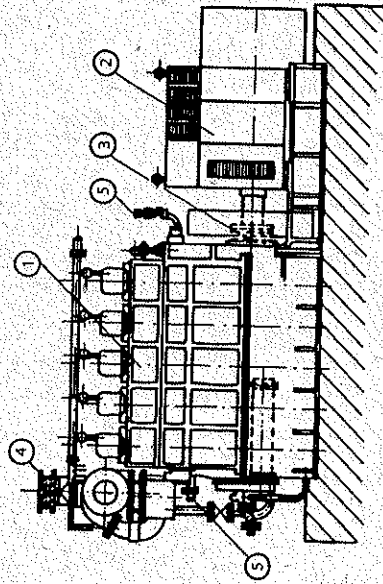


Figura 3.7 Esquema de uma central a diesel

Centrais a Vapor (Não Nucleares)

Esse tipo de central pode trabalhar tanto em ciclo aberto como em ciclo fechado. A operação em ciclo aberto é bastante comum quando se pretende utilizar calor (vapor) para o processo. Na operação em ciclos fechados, po-

As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 apresentam algumas configurações de centrais a vapor. Maiores detalhes sobre essas centrais, cujo funcionamento é baseado no ciclo térmico Rankine, serão apresentadas no item "Potência Gerada e Energia Produzida" deste capítulo.

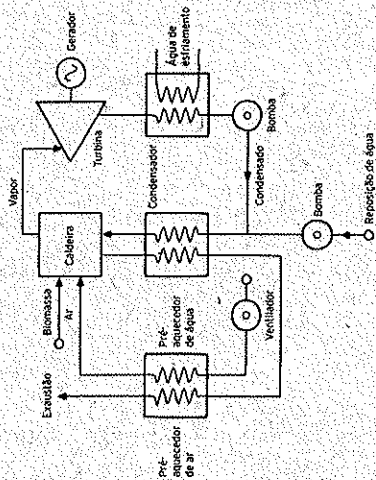


Figura 3.8 Ciclo de turbina a vapor por condensação somente para produção de eletricidade

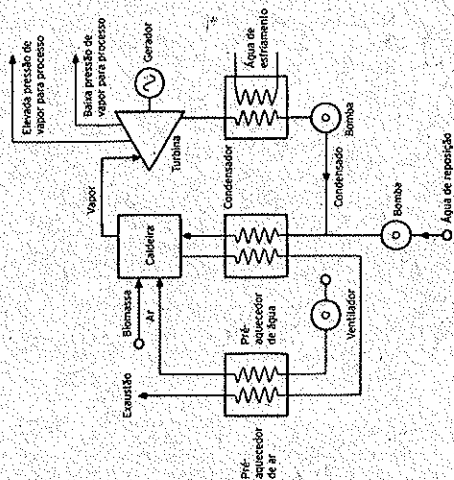


Figura 3.9 Ciclo de turbina a vapor por condensação - extração (CEST)

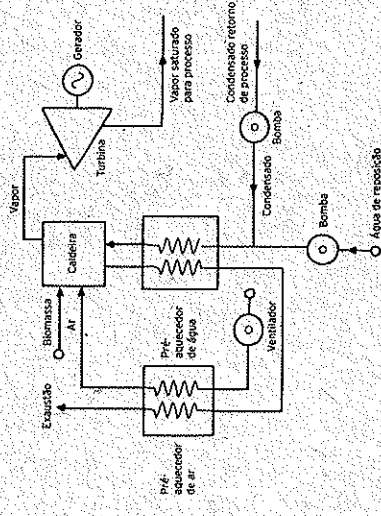


Figura 3.10 Turbina a vapor de contração para cogeração de calor e eletricidade usando biomassa como combustível

Centrais Nucleares

A Figura 3.11 apresenta um diagrama da central nuclear de Angra dos Reis (Angra I), onde foi utilizado reator nuclear de ciclo indireto, com as seguintes características principais:

- refrigerado e moderado à água leve pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor).
- combustível: pastilhas de urânio ligeiramente enriquecido (3%).
- potência térmica de 1.876 MW.
- gerador: turbo de 1.800 rpm, com 857 MW.
- condensador usando água do mar em circuito aberto.

Existem diferentes tecnologias de reatores nucleares, das quais se apresentam a seguir algumas de interesse.

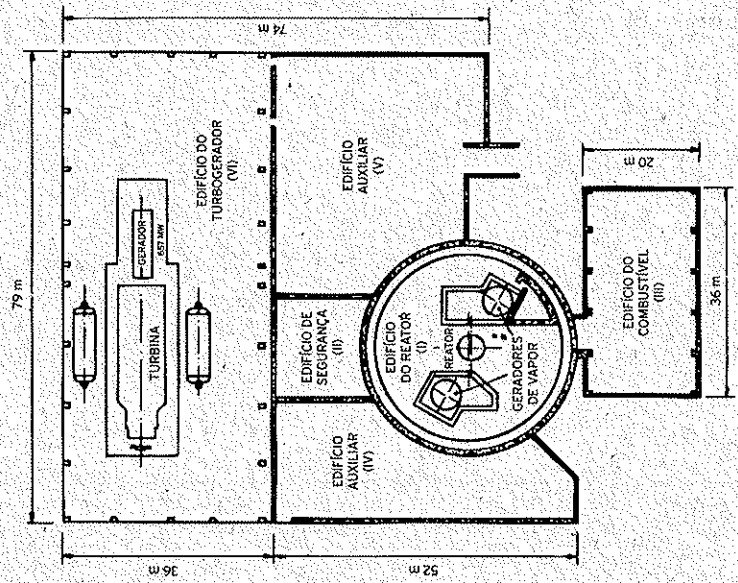
Reatores a água leve

A tecnologia atual dos reatores a água leve (LWR – Light Water Reactor) comprovou ser econômica, segura e confiável. Com capacidade superior

mente utilizam LWRs, no entanto, a tecnologia aprimorada dos PWR, com água a alta pressão, permite a construção de unidades de até 1.400 MWe.

Reatores a água pesada

Cerca de 8% das unidades em operação no mundo utilizam reatores refrigerados e moderados a água pesada (HWR – Heavy Water Reactor). São reatores econômicos, seguros e confiáveis, cuja base regulatória e de infraestrutura foi estabelecida em alguns países, principalmente Canadá, Argentina e Índia.



reatores, não ganhou o impulso esperado devido ao aumento da disponibilidade dos recursos de urânio a baixo custo, para atendimento da demanda a curto e médio prazos. A utilização dessa tecnologia será, entretanto, inevitável, uma vez que constitui o único meio de melhor utilizar as reservas de urânio.

Reatores modulares refrigerados a gás - HTGR

Este reator, o HTGR - High Temperature Gas Reactor, é também conhecido como o "Pebble Bed Modular Reactor". É um reator de pequena potência, na faixa de 200 MW e projetado para não sofrer deterioramento no caso de um acidente de graves proporções, como em Chernobyl. Utiliza como elementos combustíveis grânulos cerâmicos do tamanho de bolas de tênis, contendo milhões de gramas de urânio e revestidos por invólucros individuais de grafite. O HTGR usa hélio como refrigerador e opera em ciclo turbina-gerador a temperaturas mais altas que o vapor, conseguindo, assim, maior eficiência (40 a 45%) que os reatores LWR convencionais. A potência do reator é controlada por meio de alterações na taxa de fluxo do gás hélio e não utilizando barras de controle como no LWR. Outra característica "passiva" de segurança é a baixa densidade do combustível. Na medida em que o núcleo se torna mais quente, o combustível se espalha separando-se e a taxa de reação diminui. Três ou quatro destas pequenas unidades modulares podem ser construídas em conjunto para se obter potência similar às grandes centrais da atualidade.

Energia nuclear no mundo

No final de 2000, segundo dados da Agência Internacional de Energia Atômica, havia em operação, em 30 países, 438 usinas nucleares perfazendo uma capacidade instalada líquida de 351 GWe. Em termos mundiais, a energia nuclear foi responsável por 16% da energia elétrica produzida. Enquanto na França a energia nuclear corresponde a 76% de toda a energia elétrica, no Brasil essa participação fica em torno de 1,4%. Na Alemanha, por razões ambientais, foi acertado um acordo para fechar 19 usinas nucleares. Esse acordo permite, no entanto, às usinas já existentes, um período médio de operação de 32 anos, o que revela uma tendência no sentido de restringir ao máximo o uso desse tipo de fonte

Como variantes desse tipo de reator, existem aqueles a tubos de pressão e a vasos de pressão. A capacidade máxima atingida em usinas com reatores a água pesada é de 900 MWe, sendo o tamanho físico o principal limitador da expansão da capacidade.

O desempenho desse tipo de usina, quando operada na base, tem sido um dos melhores entre os tipos comerciais, em parte devido à possibilidade de troca de combustível com a usina em operação. Em termos de segurança, o desempenho também tem atingido excelentes níveis. O custo do ciclo do combustível é baixo devido ao uso do urânio natural e a melhor economia neutrônica decorrente da utilização da água pesada como agente moderador.

Há possibilidade de melhorar a economia do ciclo do combustível tanto dos HWRs como dos PWRs, com o emprego do combustível utilizado nos PWRs que ainda possui reatividade residual nos HWRs. Esta concepção é denominada ciclo *Tandem* e atualmente está sendo desenvolvida na Coreia. Caso se torne viável técnica e economicamente, há grandes possibilidades de uso em regiões que possuem os dois tipos de usinas, como o Brasil (PWR) e a Argentina (HWR).

Reatores a gás

Os reatores resfriados a gás (CO₂) e com combustível urânio natural tiveram grande desenvolvimento no passado. Na França, onde existe apenas uma central desse tipo em funcionamento, esses reatores foram abandonados em favor dos PWRs. Na Inglaterra chegou a ser desenvolvida uma linha mais avançada utilizando urânio enriquecido (AGR - *Advanced Gas Reactor*), mas os reatores também foram abandonados em favor dos PWRs. Resta a possibilidade da utilização de reatores a gás hélio e alta temperatura, dos quais vários protótipos estão em operação no Reino Unido, mas devem ser abandonados devido a problemas econômicos e outros, geralmente associados ao desenvolvimento de sistemas pioneiros.

Reatores refrigerados a metal líquido / Reatores super-regenerados rápidos (Fast Breeder Reactors)

O desenvolvimento dos reatores super-regenerados rápidos resfriados

Centrais a Gás

O desenvolvimento das turbinas a gás é relativamente recente e tem como maiores desafios os seguintes problemas tecnológicos:

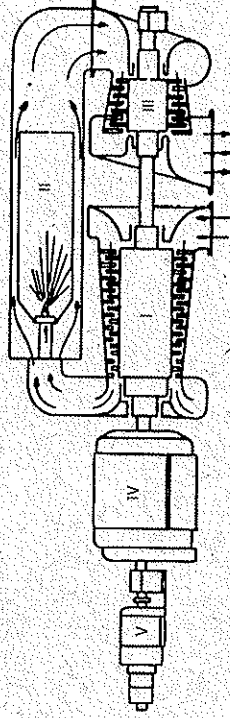
- para um rendimento razoável, exigem-se altas temperaturas. Tal possibilidade só foi alcançada recentemente com avanços na tecnologia de materiais, que ainda busca possibilidade de operar em temperaturas maiores.
- há um número excessivo de estágios no turbocompressor, o que leva a uma limitação de potência.
- o baixo rendimento dos turbocompressores foi melhorado nas últimas décadas através do desenvolvimento de turbocompressores com até 85%. Graças à implementação dos motores à reação pela indústria aeronáutica, houve um grande progresso. A operação em circuito aberto ocorre em motores a reação turbojato ou turbojato.

Oposta à operação em circuito aberto, temos a operação em circuito fechado, constituída por máquinas acionadas pela expansão dos gases quentes produzidos numa câmara de combustão, segundo um ciclo térmico denominado Brayton (Figura 3.24, mais adiante). A turbina a gás atinge eficiências termodinâmicas bem mais elevadas porque o pico do ciclo de temperatura das modernas turbinas a gás (aproximadamente 1.260°C para a melhor turbina para aplicações estacionárias no mercado) é bem mais elevado do que o das turbinas a vapor (aproximadamente 540°C). Uma vantagem termodinâmica inerente às turbinas a gás é aproveitar o calor de escape para, por exemplo, produzir vapor numa caldeira de recuperação (no esquema de Ciclo Combinado), que pode ser usada em processos industriais numa configuração de cogeração.

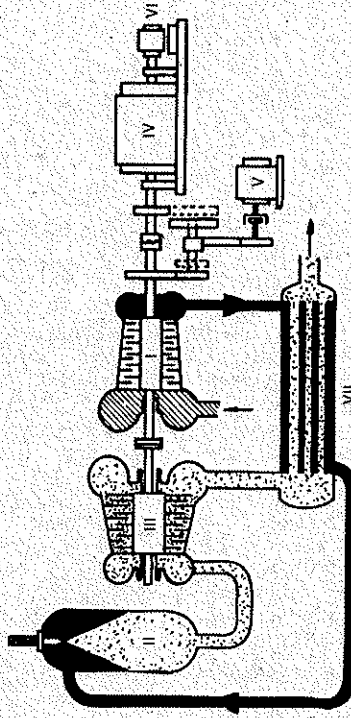
Existem dois tipos básicos de turbina a gás:

- turbinas aeroderivativas: baseadas na tecnologia adotada para propulsão de aeronaves. Compactas e de peso reduzido, essas unidades exibem alta confiabilidade e tempo reduzido de manutenção, além de elevado rendimento, o que as torna atrativas apenas para as aplicações de cogeração e geração elétrica. Neste último caso são mais apropriadas para atendimento de picos de demanda ou para funcionar em regime de emergência.
- turbinas industriais (*heavy-duty*): são de construção mais robusta, apresentando maior resistência a ambientes agressivos, sendo indicadas para ope-

A Figura 3.12 apresenta alguns esquemas de instalações com turbinas a gás.



Esquema de uma instalação com turbina a gás em circuito aberto, estacionária, com recuperação: I turbocompressor; II câmara de combustão; III turbina a gás; IV alternador; V motor de arranque e exciãtriz.



Esquema de uma instalação com turbina a gás em circuito aberto, estacionária, com recuperação: I turbocompressor; II câmara de combustão; III turbina a gás; IV alternador; V motor de arranque; VI exciãtriz; VII recuperador de calor.

Figura 3.12 Exemplos de instalações de turbinas a gás

Mais detalhes sobre as turbinas a gás, cujo funcionamento tem como base o ciclo térmico de Brayton, serão apresentados no item "Potên-

Energia Geotérmica

Em termos geológicos, a energia geotérmica é definida como o calor proveniente das profundezas da crosta terrestre, que é de aproximadamente 8×10^{20} joules, quantidade de energia 35 bilhões de vezes maior que a quantidade de energia anual consumida no mundo. Todavia, apenas uma pequena fração do calor natural pode ser extraída da crosta terrestre, principalmente por motivos econômicos. Isso limita sua exploração a uma profundidade máxima de 5 km/s. A esta profundidade, a temperatura aumenta a uma taxa média de 30° a 35° por quilômetro (gradiente geotérmico).

Devido ao gradiente térmico, o calor natural aumenta por condução (e por convecção em alguns lugares) e dissipa-se na atmosfera quando alcança a superfície terrestre. A convecção geralmente ocorre quando fluidos quentes (água, vapor e gás) fluem para a superfície terrestre ou quando ocorre a liberação de magma proveniente de erupções vulcânicas.

Para geração de eletricidade, a energia geotérmica é utilizada em altas temperaturas e a conversão pode ser feita de quatro maneiras:

- a) **Energia hidrotérmica:** proveniente de reservatórios de água quente e/ou vapor aprisionados entre rochas ou sedimentos na crosta terrestre. Há dois tipos de fontes hidrotérmicas:
 - vapor quente, que é liberado do reservatório através de um tubo inserido num buraco cavado para essa finalidade. Após a filtragem das partículas sólidas, o vapor é usado para acionar as pás de uma turbina que, conectada a um gerador, irá produzir eletricidade
 - água aquecida: o vapor é separado da água quente num vaso especial e então usado para acionar uma turbina. A água que permanece é usualmente injetada de volta à terra (método *flash*). A água quente pode ser usada para aquecer outro líquido com um ponto de ebulição menor, que se torna um gás usado para acionar uma turbina. A água quente original é então devolvida à terra (método ciclo binário).
- b) Rocha quente e seca: em áreas onde não há reservatórios subterrâneos, um poço profundo é perfurado e nele injeta-se a água, que, aquecida, é retirada de um outro poço de retorno. Essa água é levada à superfície para gerar eletricidade numa planta geotérmica de potência.
- c) Reservatórios geopressurizados: encontrados em rochas sedimentares, contêm uma mistura de água e metano (gás natural) completamente saturada

- d) **Magma:** em certas localizações é possível extrair calor do magma injetando-lhe água. Solidificado e fraturado, o magma cria uma espécie de buraco trocador de calor; esse calor será utilizado num ciclo de Rankine para gerar eletricidade. Esse aproveitamento, no entanto, exige maior recurso econômico.

Impacto ambiental da utilização da energia geotérmica

O uso da energia geotérmica, sobretudo na forma de calor, emite consideravelmente menos gases do que os combustíveis fósseis. Suas consequências ambientais podem ser subdivididas em dois grupos: temporários, relacionados à perfuração e exploração, e permanentes, resultantes da manutenção da fonte (*make-up drilling*) e da operação da planta de geração. A operação da planta envolve alguns fatores tais como ocupação do solo e impacto estético, incluindo em alguns casos torres de refrigeração; ruído; liberação de gases poluentes (H_2S , CO_2 , radon etc.) e elemento tóxico (mercúrio e arsênico) na atmosfera; lixo sólido e deposição de água residual; pequenos tremores de terra e rebaixamento do solo.

Cada uma dessas interações, todavia, pode ser limitada e/ou controlada com contramedidas adequadas.

Cogeração - Termelétricas a Ciclo Combinado - Gaseificação

Com vistas à maior eficiência energética e melhor desempenho ambiental, tem sido cada vez mais utilizado o princípio de ciclos combinados com turbinas a gás e turbinas a vapor. As técnicas de ciclo combinado permitem a redução do consumo específico de combustível e a consequente redução das emissões de CO_2 .

Das perdas totais de um sistema termelétrico convencional a vapor, 10% referem-se à caldeira e cerca de 55% ao calor contido no vapor de exaustão nas turbinas a vapor. O vapor de exaustão das turbinas de condensação utilizadas nas usinas termelétricas apresenta temperaturas entre 30° e $45^\circ C$ e contém por volta de 610 kcal/kg de vapor, calor que será praticamente todo dissipado para o meio ambiente pelas torres de resfriamento, representando grande energia térmica perdida. Para tornar essa energia utilizável, pode-se promover um escape com temperaturas mais elevadas, de 200 a $300^\circ C$, ou utilizar turbinas a gás, cujo calor de

Dessa forma, a quantidade de calor perdida pode ser recuperada através do processo de cogeração, cada vez mais utilizado em todo o mundo. Devido a sua importância cada vez maior no setor energético, a cogeração será tratada especificamente a seguir.

Cogeração

Sistemas de cogeração são aqueles em que se faz simultaneamente e de forma sequencial a geração de energia elétrica e térmica a partir de um único combustível, tais como gás natural, carvão, biomassa ou derivados de petróleo.

Um sistema de cogeração bem dimensionado e balanceado, do ponto de vista da porcentagem final de cada uma das duas formas de energia, aumenta o rendimento global da utilização do combustível empregado, atuando, assim, no sentido do aumento da eficiência energética.

a) Tecnologias disponíveis

As principais tecnologias disponíveis para os projetos de cogeração, no momento, são:

- turbinas a gás e vapor: foram tratadas especificamente em outros itens deste mesmo capítulo.
- motores a combustão: podem ser motores a gás ou a óleo diesel e existem modelos adequados a sistemas de cogeração. Para regime de operação contínua e sistema de resfriamento apropriado, permitem a recuperação de calor liberado pelo bloco, do óleo e do *after-cooler*. O restante de calor é obtido dos gases de descarga. Em geral apresentam uma eficiência maior do que as turbinas a gás.
- células a combustível: serão tratadas no penúltimo capítulo deste livro.
- novos sistemas em desenvolvimento:
 - Kalina Cycle: amônia + água aumentam a eficiência no ciclo de Rankine.
 - Cheng Cycle: melhor eficiência de cogeração com turbina a gás, pela reutilização do vapor, injetando-o na câmara de combustão.
 - Aplicação do carvão gaseificado em ciclo combinado: uso como gás em turbina a combustão.
 - Magnetohidrodinâmica: o movimento do gás quente ionizado (condutor) através de campo magnético produz l.c. Ar quente ionizado + combustível vão

b) Principais configurações e ciclos

Topping and bottoming cycle system

Nos sistemas do tipo *topping cycle*, o energético produz primeiramente vapor, que, utilizado para produção de energia mecânica e/ou elétrica em turbinas a vapor, é depois repassado ao processo (Figura 3.10).

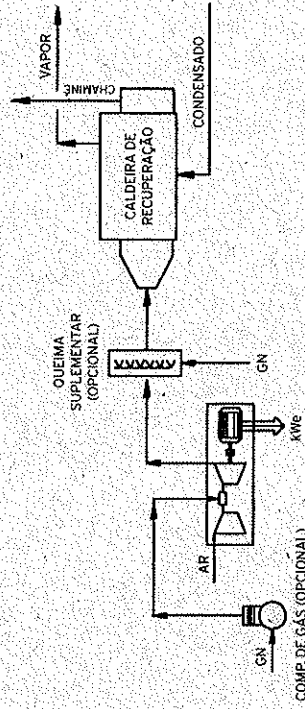


Figura 3.13 *Topping Cycle*
Fonte: Guimarães (1998).

Nos sistemas com *bottoming cycle*, o energético produz primeiramente vapor, que, utilizado para produção de energia mecânica e/ou elétrica em turbinas a vapor, é depois repassado ao processo (Figura 3.10).

c) Ciclo combinado

Consiste num processo que gera energia conjugando o ciclo de Brayton (turbina a gás) com o ciclo de Rankine (vapor). Ou seja, o calor recuperado dos gases de exaustão é utilizado para acionar uma turbina a vapor. A Figura 3.14 apresenta um diagrama simplificado de um ciclo combinado. O preferido de muitas concessionárias e produtores independentes nos Estados Unidos para utilização com gás natural (esse é hoje o mais eficiente dos processos existentes)

Esses sistemas são particularmente interessantes quando o uso do vapor for intermitente, de forma que, na baixa demanda de vapor, in-

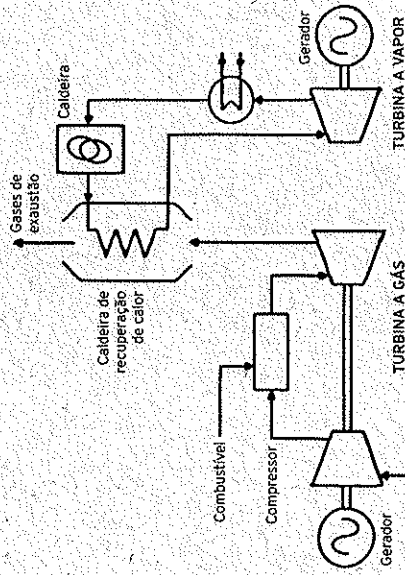


Figura 3.14 Ciclo combinado: diagrama simplificado

Nos sistemas de ciclo combinado em que se produz exclusivamente energia elétrica, todo o vapor produzido por recuperação é empregado na turbina a vapor, retornando à caldeira por condensação.

SISTEMAS DE COGERAÇÃO A PARTIR DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Sistemas estacionários para suprimento de energia elétrica baseados em células a combustível produzem energia elétrica de boa qualidade e possibilitam o aproveitamento do calor residual para produção de vapor ou água quente utilizável nas dependências do consumidor. Além de operarem silenciosamente, não produzem emissões nocivas ao meio ambiente e não requerem grande manutenção.

A cogeração é possibilitada pela exaustão da água em forma de vapor e pela água quente proveniente do sistema de resfriamento da célula, que podem ser utilizadas em processos industriais, em hospitais, hotéis, shoppings centers, entre outros.

A instalação de uma central de cogeração por células a combustível, operando em paralelo com a concessionária de energia elétrica, provoca o deslocamento parcial do consumo e da demanda de energia elétrica e uma economia do combustível antes utilizado para a geração térmica. Em contrapartida, há consumo de combustível para operação

Devido aos altos custos de implantação e dos combustíveis, os ensaios realizados para viabilizar projetos de cogeração por células a combustível não têm apresentado taxas e tempo de retorno do investimento concorrentes com o fornecimento pela concessionária.

Espera-se, no entanto, que dentro de poucos anos (menos de uma década), veículos e centrais de cogeração à base de células a combustível deverão estar disponíveis no mercado de forma competitiva com as tecnologias convencionais.

d) Combustíveis – Gás Natural – Gaseificação

Os ciclos combinados podem ser formados por combinação de diferentes tipos de gás e combustíveis para gerar o vapor. Dentre eles destacam-se o carvão mineral e a biomassa, devido à possibilidade de gaseificação do próprio combustível gerador do vapor, o que aumentaria a capacidade obtível da central, assim como seu rendimento.

CARVÃO MINERAL

A combustão do carvão produz vapor usado para movimentar turbinas e geradores elétricos.

As unidades a carvão podem ser construídas em tamanhos que variam de 20 a 1.000 MW. Muitas estações são projetadas para operar com um tipo específico de carvão. No entanto, com variados graus de modificações, podem ser convertidas para outro tipo: gás natural, óleo, misturas de óleo e carvão ou resíduos diversos.

Os custos de manutenção aumentam com a idade da usina, principalmente devido à deterioração dos equipamentos pelas altas temperaturas, altas pressões e estresses térmicos causados pelas frequentes paradas e retomadas de potência.

A combustão do carvão produz dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio (também conhecidos como gases ácidos) e CO_2 , responsável pelo efeito estufa. Todas as emissões podem ser controladas com a utilização de carvão com baixo teor de enxofre, queimadores seletivos de enxofre e depuradores de enxofre (FGD – *flue gas desulfurization*). Redutores catalíticos seletivos removem NO_x do gás e melhoram a combustão.

A combustão do carvão também produz resíduos sólidos, que, na falta de um uso alternativo, criam um problema de descarte. A cinza, que

Dentro da técnica do ciclo combinado, destacam-se dois processos:

- *Combustão fluidizada a alta pressão*: já se encontram em operação unidades, na faixa de 80 a 100 MW, em caráter de desenvolvimento e demonstração de tecnologias, comissionadas a partir de 1990. A escala econômica para empreendimentos com base nesta tecnologia tende a situar-se em potências acima de 300 MW.
- *Gaseificação e combustão fluidizada em sistema de ciclo combinado* top-ping cycle: se considerada sua aplicação aos carvões brasileiros, essa tecnologia teria como ponto crítico a adequação de um processo de gaseificação às características desses carvões. Os rendimentos alcançáveis através deste processo de geração podem atingir 50%, caracterizando um consumo específico de carvão menor do que o obtido em um processo termelétrico convencional.

BIOMASSA

Uma alternativa promissora ao ciclo de turbina a vapor para geração com biomassa seria o uso das tecnologias de turbina a gás/gaseificação integrada da biomassa. Esse conjunto de tecnologias, que já foram desenvolvidas para o gás natural e outros combustíveis líquidos nobres, com gaseificadores fechados de biomassa, envolve o casamento dos ciclos avançados de Brayton (turbina a gás) para geração elétrica ou cogeração, o qual pode ser baseado nos gaseificadores de carvão. Esse esquema poderia trazer algumas vantagens ambientais para centrais com combustível biomassa cujo aproveitamento traz, no entanto, algumas preocupações com relação à poluição local do ar e ao aquecimento global. O desafio é produzir biomassa de forma sustentável e preservar a diversidade biológica.

Como combustível, a biomassa é inerentemente mais limpa do que o carvão porque geralmente contém menos enxofre e cinzas. Todavia, as emissões dependem da tecnologia utilizada. A queima da biomassa, sob algumas circunstâncias, em áreas tropicais de países em desenvolvimento, tem também contribuído para mudanças no clima global, principalmente devido a emissões de CO_2 e CH_4 , e para o depósito de ácidos, através da emissão de ácidos orgânicos.

Usando a tecnologia BIG/GT (*biomass-integrated/gas turbine techno-*

logy em níveis muito baixos. A grande preocupação com a poluição local proveniente dos sistemas BIG/GT é com relação ao óxido de nitrogênio (NO_x), capaz de ser dividido em dois tipos principais que aparecem em diferentes processos: o NO_x térmico, que surge da oxidação do nitrogênio na combustão do ar em elevadas temperaturas na câmara de combustão, e o NO_x formado do nitrogênio na biomassa. A emissão de CO_2 é praticamente zero se a biomassa for produzida de forma sustentável (com a quantidade de biomassa usada aproximadamente igual ao seu crescimento no mesmo período): o CO_2 liberado na combustão sob tais condições é igual ao extraído da atmosfera durante a fotossíntese.

Outra preocupação diz respeito à manutenção da diversidade biológica. Não há, nos sistemas que fazem uso da biomassa, uma vigorosa proteção que promova essa manutenção. Porém, o impacto da produção de bioenergia depende sensivelmente de como a biomassa é produzida. Se florestas nativas são substituídas por plantações de monocultura, há perda substancial de biodiversidade. Porém, o *status quo* pode ser melhorado se as plantações forem estabelecidas em terras vastiadas ou degradadas.

GÁS NATURAL

No contexto da cogeração, o gás natural pode ser usado para movimentar uma turbina de combustão, para produzir vapor, que movimentará uma turbina a vapor num esquema de ciclo combinado, ou ainda como combustível de uma célula a combustível.

A queima de gás natural não produz cinza nem SO_2 e a emissão de CO_2 é mínima. Só a emissão de NO_x é a mais significativa.

No caso de cogeração através de ciclo combinado, maiores índices de eficiência são obtidos na conversão do combustível do que em uma usina convencional (cerca de 45%, no máximo, para centrais a vapor e de 55 a 60% para turbinas aeroderivativas a gás). Essa eficiência pode chegar, em alguns casos, a 90%.

Em um ciclo de turbina a gás simples, a turbina de combustão opera como uma turbina de avião (turbina aeroderivativa): o combustível é misturado ao ar comprimido e expandido em uma câmara de combustão. O gás quente expandido movimenta, então, uma turbina acoplada

Quanto ao gás natural em células a combustível, uma eletrólise reversa converte oxigênio e hidrogênio em água e eletricidade. Embora as células a combustível sejam conhecidas há mais de 25 anos, sua aplicação tem sido restrita ao espaço e sob a água. É possível formar uma planta de cogeração de energia por células a combustível através de uma tecnologia modular, em que cada célula pode ter um volume de 30 cm³ ou menos.

RESÍDUOS E SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS E AGRÍCOLAS

Resíduos diversos - tais como cavaco, bagaço de cana, bagaço de laranja, gás resultante do tratamento de esgoto ou de depósitos de lixo e lixo sólido - são combustíveis que podem ser aproveitados para a geração de energia elétrica. Alguns subprodutos de processos industriais, como gás de processo ou subprodutos de refinarias de petróleo, são, também, excelentes combustíveis para a geração de energia elétrica. A queima dos resíduos produz vapor então utilizado para movimentar uma turbina acoplada a um gerador que produz a energia elétrica. A potência da unidade depende da quantidade disponível e do poder calorífico do resíduo.

ÓLEO

A combustão do óleo emprega tecnologias e configurações similares às utilizadas para a combustão do carvão, assim como os impactos ambientais e as tecnologias empregadas para controle das emissões são semelhantes às desse combustível.

POTÊNCIA GERADA E ENERGIA PRODUZIDA

Em sua forma geral, para energia gerada vale a mesma expressão aplicável a todo tipo de geração:

$$EG = P \times FC \times 8.760$$

em que: P é a potência instalada; FC é o fator de capacidade e 8.760 é o número de horas no ano.

A potência gerada em uma central termelétrica, por outro lado, depende de vários fatores. Destacam-se, dentre as variáveis usualmente

Para seu entendimento, é necessário enfocar alguns conceitos fundamentais da geração termelétrica e os principais ciclos termodinâmicos básicos (teóricos e práticos) sobre os quais essa geração se baseia. Como este livro não visa a um aprofundamento nesse assunto, remete-se o leitor à bibliografia sugerida. Aqui serão enfocadas as termelétricas a vapor e a gás, cujo funcionamento teórico é baseado nos ciclos termodinâmicos a vapor e a ar, respectivamente.

Antes de enfocar os referidos ciclos, é conveniente apresentar a conceituação e a formulação da potência extraível de uma máquina térmica, que se aplicará a qualquer ciclo que venha a ser analisado.

Para um sistema térmico ideal, sem perdas, essa potência, em kW, pode ser calculada, por:

$$P = \dot{m} (h_1 - h_2)$$

em que: P é a potência disponível; \dot{m} é a massa de fluido passando pela transformação térmica, por unidade de tempo, em kg/seg; e h a entalpia específica do fluido, dada em kJ/kg, sendo h_1 a entalpia na entrada da máquina térmica e h_2 a entalpia na saída da máquina térmica. Em sua forma geral, a entalpia, é dada por: $h = u + \frac{p}{\rho}$, sendo μ uma medida da energia interna do fluido, p a pressão a que está submetido e ρ a sua densidade.

O processo, na prática, é submetido a perdas, e o trabalho realmente obtido é menor que o teórico apresentado acima. O efeito dessas perdas, que leva à introdução do conceito de rendimento, pode ser verificado, por exemplo, na Figura 3.15, que apresenta o diagrama de Mollier (entalpia x entropia) do vapor d'água.

Neste diagrama, a transformação 1 - 2 representa a condição ideal, enquanto que a passagem do fluido do estado 1 para o estado 2' representa a condição real.

A partir do diagrama e da expressão da potência, tem-se:

$$P_{\text{real}} = P_{\text{ideal}} = \dot{m} * (h_1 - h_2')$$

$$P_{\text{disponível}} = P = \dot{m} * (h_1 - h_2)$$

$$\text{Define-se o rendimento: } \eta = \frac{h_1 - h_2'}{h_1 - h_2}$$

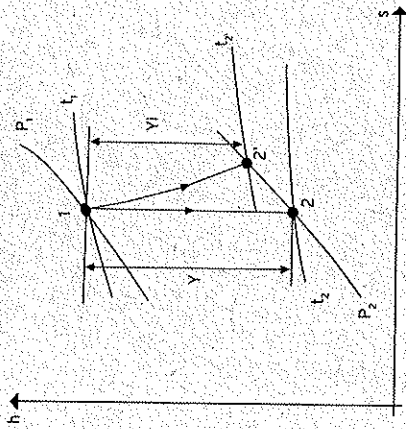


Figura 3.15 Diagrama de Mollier (entalpia x entropia)

Termelétricas a vapor

O desempenho das termelétricas a vapor pode ser avaliado através dos ciclos termodinâmicos do vapor d'água, cujas características são usualmente apresentadas em diagramas de estado, como o de Mollier (entalpia x entropia) ou outros similares, como o de temperatura x entropia ilustrado pelas Figuras 3.16a e 3.16b.

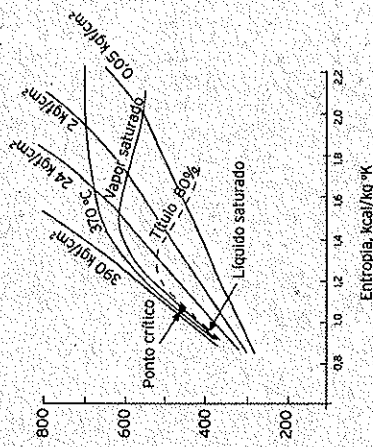
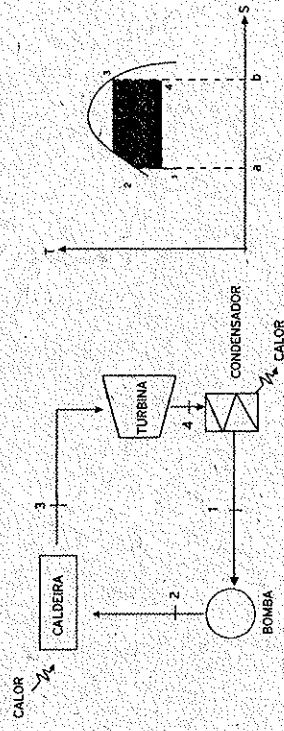


Figura 3.16b Diagrama de temperatura x entropia

O ciclo teórico fundamental aplicável às termelétricas a vapor é aquele de Carnot e o ciclo base para as aplicações práticas, nesse tipo de geração termelétrica, é o Rankine. As principais relações deste último ciclo com uma central termelétrica a vapor são apresentadas nas Figuras 3.17 e 3.18, a seguir, para sistemas sem e com superaquecimento do vapor, respectivamente.

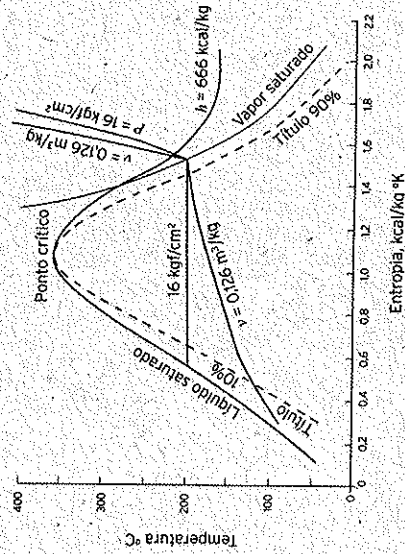
a) Ciclo Rankine



Figuras 3.17 Ciclo Rankine sem superaquecimento do vapor

12: Bombeamento adiabático reversível (dQ=0)

2-3: Troca de calor a pressão constante na caldeira



Se, no ciclo Rankine, se considerar o superaquecimento do vapor, tem-se:

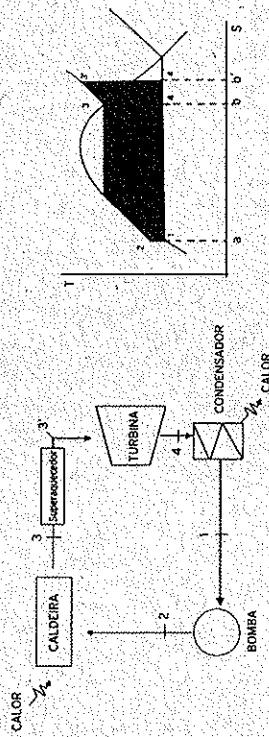


Figura 3.18 Ciclo Rankine com superaquecimento do vapor

Com relação aos ciclos e figuras apresentados, ressalta-se:

- A área hachurada representa o trabalho desenvolvido no ciclo.
- A área delimitada pela curva superior do ciclo e o eixo das entropias (a23ba, no primeiro caso, e a233'b'a, no segundo caso) representam o calor transferido ao fluido.
- A área delimitada pela curva inferior do ciclo e o eixo das entropias (a14ba, no primeiro caso e, 14'b'a no segundo) representa o calor transferido do fluido para o ambiente.
- O ciclo Rankine, escolhido como o ideal representativo da central termelétrica a vapor, apresenta duas características importantes que o relacionam com o ciclo ideal:
 - antes do processo de bombeamento, é efetuada a transformação em líquido. Na prática é o que deve ser feito, pois não existe equipamento que aumente a temperatura e ao mesmo tempo transforme essa mistura em líquido.
 - com superaquecimento, o calor é transferido antes de se efetuar a expansão (queda de pressão), que é o que se pode fazer na prática. As variáveis de controle (sobre as quais se atua para melhorar o desempenho) são, como já se viu, a pressão e a temperatura, cujo efeito é verificado na Figura 3.19, a seguir.
- Aumento da temperatura na entrada da turbina (superaquecimento)

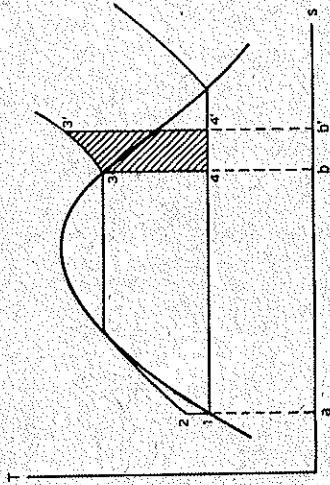


Figura 3.19 Efeito do aumento da temperatura na entrada da turbina

Conforme aumenta o rendimento, aumenta também o título (porcentagem de água no estado gasoso) do vapor na saída da turbina. Entretanto, existe um cuidado a ser tomado: o material pode não suportar altas temperaturas.

- Aumento da pressão máxima do vapor (e conseqüente aumento na temperatura).

Nesse caso, o trabalho líquido tende a permanecer o mesmo e o calor rejeitado diminui, aumentando o rendimento.

Na prática, com base no ciclo enfocado, diversas providências podem melhorar o desempenho da geração. As mais comuns são o reaquecimento e a regeneração, enfocados a seguir:

b) O ciclo com reaquecimento

Utiliza-se reaquecimento em um ciclo para tirar partido das vantagens do uso de pressões mais altas e evitar umidade excessiva nos estágios de baixa pressão da turbina. Este ciclo é representado na Figura 3.20.

c) O ciclo regenerativo

Com aquecedores da água de alimentação (Figura 3.21). Na geração termelétrica prática, pode-se usar, mais de uma vez, reaquecimento e regeneração combinados. Sempre para melhorar o desempenho do sistema total, muitas vezes se divide o sistema em mó-

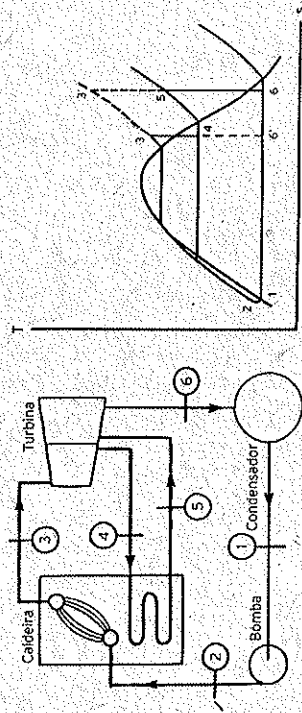


Figura 3.20 Exemplo de um ciclo com reaquecimento

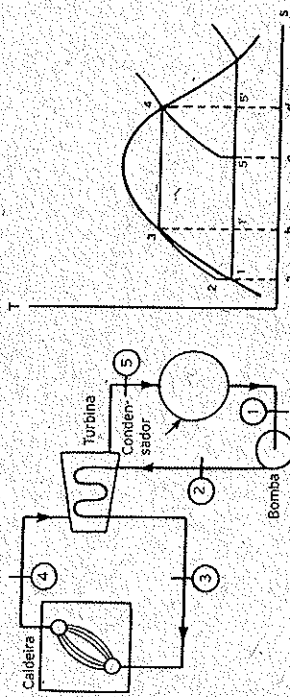


Figura 3.21 Exemplo de um ciclo regenerativo

pressão) em cascata com turbinas de média pressão (expandindo até baixa pressão) e de baixa pressão (expandindo até a pressão de vapor para o processo).

Afastamento dos ciclos reais em relação aos ideais

Nos ciclos reais, devem ser consideradas as perdas. As principais são:

- Perdas na tubulação por atrito e transferência de calor ao meio envolvente.

- Perdas de carga na caldeira.
- Perdas na turbina e na bomba (representadas pelo rendimento desses equipamentos).
- Perdas no condensador (problemas análogos ao primeiro item).

Termelétricas a gás e a diesel

Muitos aparelhos, como o motor de ignição de automóvel, o motor diesel e a turbina a gás convencional usam gás como fluido de trabalho.

Durante a combustão, o fluido de trabalho se altera, mudando de mistura de ar e combustível para produtos de combustão. Esses são os chamados motores de combustão interna (em oposição à instalação a vapor, tipicamente de combustão externa). Como o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico completo, o motor de combustão interna opera segundo o chamado ciclo aberto. Para análise, no entanto, podem ser utilizados ciclos fechados que, mediante algumas restrições, são boas aproximações dos ciclos abertos. Uma das aproximações bastante válida para o entendimento qualitativo do processo é o ciclo ideal a ar baseado nas seguintes hipóteses:

- Uma massa fixa de ar é o fluido de trabalho em todo o ciclo e o ar é sempre tratado como gás perfeito. Não há processo de entrada e saída de massa.
- O processo de combustão é substituído por processo de transferência de calor ao meio envolvente (em contraste com saída e entrada no motor real).
- Todos os processos são internamente reversíveis.
- Considera-se que o ar tem calor específico constante.

Os principais ciclos termodinâmicos a ar são o ciclo padrão de Carnot, o de Otto, o Diesel, o Ericsson, o Stirling e o Brayton. As diferenças entre eles devem-se aos processos diferentes para ir de um estado a outro e à incorporação de regeneração. Desse, apenas o Diesel (Fig. 3.22) e o Brayton (Fig. 3.23) serão abordados, pois conseguem adequar-se melhor à aplicação prática das gerações termelétricas a diesel e a gás, respectivamente.

a) Ciclo padrão de ar Diesel

É o ciclo ideal aplicável ao motor diesel, também chamado motor de ignição por compressão.

Com relação ao ciclo real, os processos de descarga e admissão são aqui substituídos por uma rejeição de calor a volume constante no ponto morto inferior, 4 - 1.

$$\eta_r = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_p(T_3 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_3/T_1 - 1)}{k T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

em que: k é a relação de calores específicos (a pressão e volume constantes): $k = \frac{C_p}{C_v}$

No ciclo Diesel, a razão de compressão isentrópica, definida como $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$, é maior que a razão de expansão isentrópica $\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$.

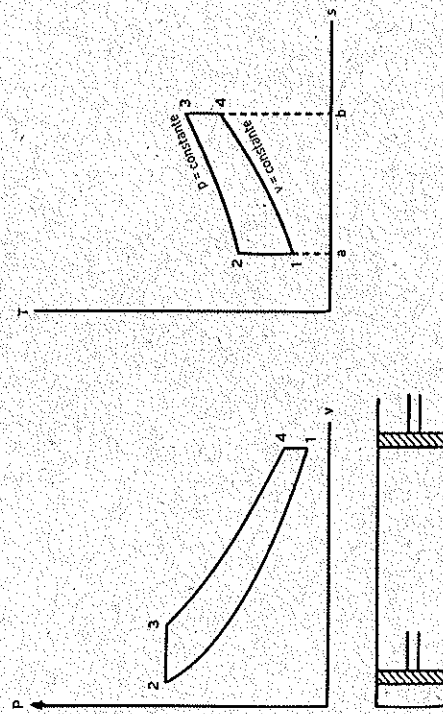


Figura 3.22 O ciclo de ar de Diesel

b) O ciclo Brayton

É o ciclo ideal para representação da turbina a gás simples (de ciclo

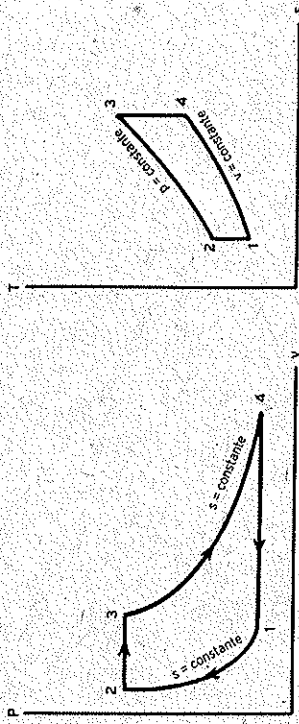


Figura 3.23 O ciclo de ar de Brayton

Nesse ciclo, o rendimento é dado por:

$$\eta_r = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}$$

sendo, então, função da relação de pressão isentrópica: P_2/P_1 .

A turbina a gás real difere da ideal pelas irreversibilidades na turbina e no compressor e pelas perdas de carga nas passagens de fluido e na câmara de combustão (ou trocadores de calor, no caso do ciclo fechado). Além disso, há uma grande quantidade de trabalho realizada no compressor (pode estar na faixa de 40 a 80% da potência desenvolvida na turbina).

c) O ciclo simples de turbina a gás com regenerador

Como $T_4 > T_2$, o calor pode ser transferido dos gases de descarga (na saída da turbina, à temperatura T_4) para os gases de alta pressão que deixam o compressor. Se isso for feito em trocador de calor de contracorrente (regenerador), então T_x (no caso ideal) pode ser igual a T_4 . $T_4 > T_2$ é a condição para que aconteça regeneração, o que resultará em aumento do rendimento do ciclo. Este ciclo é apresentado na Figura 3.24.

A Figura 3.25 apresenta o ciclo ideal da turbina a gás usando compressão em vários estágios, resfriamento intermediário e vários estágios

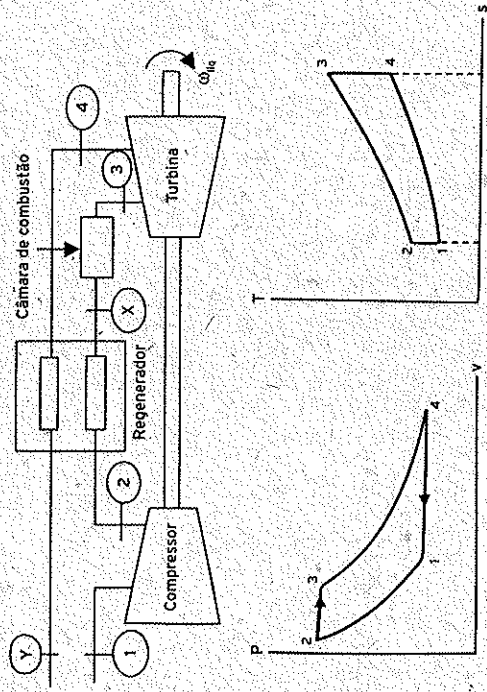
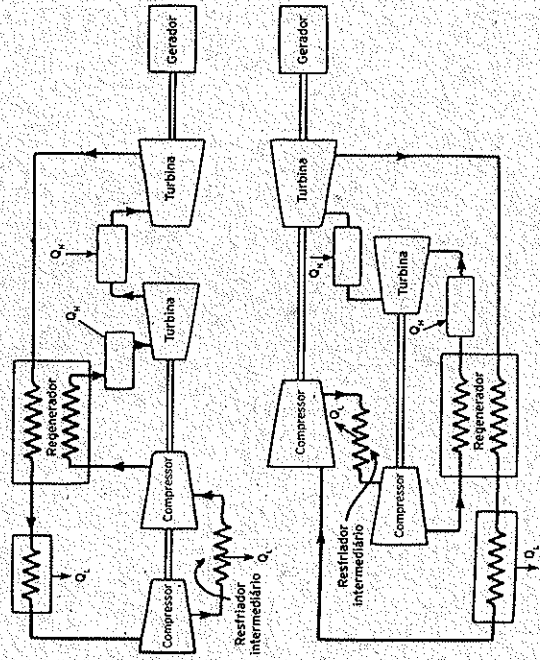


Figura 3.24 Ciclo simples de turbina a gás com regenerador



INSERÇÃO NO MEIO AMBIENTE

Por operarem a partir da queima de combustíveis, em sua maioria derivados de petróleo ou carvão mineral, as usinas termelétricas acarretam diversos impactos negativos ao meio ambiente. Com o objetivo de permitir uma visão mais completa do assunto, considerando as perspectivas de aplicação da geração termelétrica no país, são apresentados, a seguir, os seguintes tópicos: principais impactos negativos da geração termelétrica, impactos associados a tecnologias avançadas de cogeração, uma comparação entre termelétricas a óleo e a gás natural.

Principais impactos Negativos da Geração Termelétrica

Apenas com o objetivo de ilustrar aspectos primordiais relacionados com a inserção das termelétricas no meio ambiente, a seguir são apresentados os principais impactos ambientais negativos da geração termelétrica, com uma breve descrição de seus efeitos.

Os efluentes de uma termelétrica podem ser classificados basicamente em aéreos, líquidos e sólidos. Os afluentes aéreos são aqueles que apresentam maior potencial poluidor.

Efluentes aéreos

A geração de energia elétrica pelas centrais termelétricas é a segunda maior produtora dos gases-estufa (CO_2 , principalmente) e, portanto, de grande influência no aquecimento global (*Global Warming*), perdendo apenas para o setor de transportes. Os países desenvolvidos são os maiores responsáveis por isso, devido a sua grande dependência da geração termelétrica. Uma série de discussões e acordos internacionais busca, há algumas décadas, a redução mundial das emissões. O ponto de partida internacional mais conhecido com esse objetivo foi o Protocolo de Kyoto, que, em sua origem, visava estabelecer metas de redução de emissão de gases-estufa, permitindo, entre outras ações, a negociação de cotas de emissão, através de bônus associados a projetos redutores da produção desses gases ou sequestradores de CO_2 . Daí surgiu o CDM (*Clean Development Mechanisms*) ou MDI (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo) para facilitar e criar um mercado para tais negociações. Nessa dis-

países em desenvolvimento e, apesar das diversas rodadas de negociação e uma retardada ratificação do Tratado de Kyoto, a situação não se encontra melhor do que no início e as reuniões prosseguem cada vez mais complexas (devido aos interesses específicos de países e indústrias envolvidos), embora a urgência pela ocorrência de grandes efeitos climáticos venha sendo requerida em regime de alerta por diversos cientistas, políticos e instituições envolvidas com o assunto. Por ser uma questão muito importante, devido ao seu impacto na matriz energética futura, do mundo e do Brasil, deve ser acompanhada de perto, pois pode ser um grande acelerador da geração renovável nos países em desenvolvimento, principalmente através da utilização da biomassa.

a) Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é o principal efluente aéreo produzido no mundo, não só pela geração de energia elétrica, mas também pelos transportes, atividades industriais e residenciais (para aquecimento). O CO₂ corresponde a 66% das emissões mundiais de gases, dos quais 95% são provenientes do hemisfério norte, ou seja, dos países desenvolvidos.

Na natureza, o CO₂ é fundamental no processo de respiração das plantas, como componente necessário à fotossíntese. Ele é devolvido à atmosfera no processo de queima, decomposição e consumo de matéria orgânica por animais. No planeta, os maiores reservatórios naturais de CO₂ são os oceanos, ficando a atmosfera com apenas 1% desse efluente neles presente.

Quando em excesso na atmosfera, o CO₂ é o principal causador do efeito estufa, que pode implicar o aquecimento global do planeta. Como é dissociável em água, a sua presença na atmosfera, em combinação com o ácido carbônico, contribui para formação de chuva ácida. Seu excesso também pode causar dificuldades respiratórias, principalmente em idosos e recém-nascidos.

O principal problema associado ao CO₂ está na queima dos combustíveis fósseis, a qual não apresenta um balanço energético para absorção do efluente, ao contrário da biomassa, que, como já foi frisado, é uma das alternativas energéticas ao uso de combustíveis fósseis na

A absorção de CO₂ pelas águas dos oceanos é lenta e não acompanha o ritmo crescente das emissões mundiais. As florestas também não são suficientes para absorver toda a emissão, além de estarem diminuindo mundialmente.

b) Óxidos de enxofre (SO)

O enxofre presente no combustível transforma-se, durante a combustão, em óxidos de enxofre, principalmente dióxidos de enxofre (SO₂). Na atmosfera, o SO oxida-se dando origem a sulfatos e gotículas de ácido sulfúrico. As emissões sulfurosas de usinas a óleo combustível são, em geral, superiores àquelas de usinas a carvão e a gás natural (que têm o menor impacto), pois os derivados de petróleo possuem normalmente um teor de enxofre maior que o carvão mineral. O SO é responsável por problemas respiratórios na população que vive em torno de usinas que não controlam suas emissões. Dependendo de sua concentração na atmosfera pode possibilitar o surgimento de chuva ácida e outros efeitos ambientais, a consideráveis distâncias do local da emanração.

c) Material particulado (MP)

Uma parte das cinzas, formadas durante o processo de combustão ou presentes no combustível, é arrastada pelo fluxo de gases para a chaminé, sendo lançada para a atmosfera. O material particulado afeta o meio ambiente pelos efeitos decorrentes de sua deposição nos bens imóveis e suas benfeitorias, no sistema respiratório de pessoas e animais, em plantas e vegetais, na ação sobre a visibilidade atmosférica e instalações elétricas etc.

O teor de particulados produzido numa central a carvão é bem maior do que em centrais a óleo e a gás natural, já que os teores de cinzas nos carvões minerais são sempre bem mais altos do que nos óleos combustíveis e no gás.

d) Óxidos de nitrogênio

São formados durante o processo de combustão e dependem da tem-

caldeiras. Derivam-se do nitrogênio existente no combustível e do ar utilizado para a combustão. Em concentrações altas, o NO_x provoca o agravamento de enfermidades pulmonares, cardiovasculares e renais, bem como a redução no crescimento das plantas e a queda prematura das folhas. O NO_x, em particular, é substância-chave na cadeia fotoquímica para a formação do *smog*.

e) Monóxido de carbono e hidrocarbonetos

O maior perigo dos hidrocarbonetos decorre da sua reação fotoquímica com os óxidos de nitrogênio, gerando compostos oxidantes. O monóxido de carbono, por sua vez, é um item importante para o controle da eficiência de operação da caldeira, devendo, portanto, estar sob constante monitoramento. Ambos são emitidos devido à queima incompleta do combustível.

Efluentes líquidos

Produzidos numa termelétrica, os efluentes líquidos podem afetar física e/ou quimicamente o solo e as águas superficiais e subterâneas. Os principais efluentes líquidos são:

a) Sistema de refrigeração

No caso de refrigeração por circulação direta, podem ocorrer problemas com a fauna e com a flora da fonte d'água, em função da elevação da temperatura do efluente final em relação ao captado.

Muitas vezes, a quantidade de água necessária para o sistema de refrigeração pode entrar em conflito com outras utilizações, no contexto do uso múltiplo das águas de uma bacia fluvial, acarretando outros tipos de problemas ambientais.

Nesse caso, a solução é utilizar sistema com torre úmida que requer que se trate e purgue líquido refrigerante a fim de evitar a formação de incrustações.

b) Sistema de tratamento de água

Para produzir vapor, as termelétricas necessitam de água tratada para

produtos químicos que resultam em efluentes potencialmente poluidores do solo, lençol freático, cursos d'água etc.

c) Purga das caldeiras

A formação de incrustações devido à presença de sais na água é um problema constante nas caldeiras a vapor, que pode ser minimizado quando se utiliza água desmineralizada de alta qualidade misturada a produtos químicos. A finalidade dessa combinação é limitar a presença de sólidos em suspensão no interior das caldeiras.

Essa purga é contínua e em torno de 1% da vazão nas caldeiras com tubulação e visa à retirada de sólidos suspensos e excesso de produtos químicos. Esse efluente é potencialmente poluidor do solo, lençol freático, cursos d'água etc.

d) Líquidos para limpeza de equipamentos

Os depósitos que se acumulam nos equipamentos de queima e de geração de vapor dificultam a troca de calor e necessitam de remoção periódica com produtos químicos líquidos, potencialmente poluidores do meio ambiente.

Outros efluentes

Além dos descritos, outros efluentes, como os provenientes de vazamento de tanques de combustíveis, rompimento de selos de bombas, falhas de válvulas etc., podem ser poluidores, dependendo das suas características químicas.

a) Efluentes sanitários e de drenagem

Os despejos sanitários podem ser prejudiciais ao meio ambiente em função de reações químicas que podem prejudicar a fauna e constituir-se em foco contínuo de bactérias capazes de transmitir doenças. Esses despejos são constituídos pelos esgotos orgânicos, despejos sanitários, lavagens de refetórios etc.

Dependendo do tipo da composição química desses efluentes, a drenagem dos líquidos acumulados no chão e pátios, pelas chuvas e lim-

b) Efluentes sólidos

Produzidos numa usina termelétrica, são constituídos pelas cinzas e poeiras consequentes da operação da usina e podem afetar física e/ou quimicamente o ambiente.

CINZAS

Resíduos do processo de combustão, são de dois tipos: cinzas leves ou volantes (*fly ash*) ou cinzas pesadas (*bottom ash*).

As cinzas não devem ser abandonadas no meio ambiente pois, com a ajuda das chuvas e dos ventos, podem formar efluentes poluidores e contaminar a atmosfera, o solo e a água.

É importante lembrar que, no caso das usinas nucleares, a situação ambiental é bastante diferente. Embora se apliquem as restrições aqui apresentadas para os vários tipos de efluentes, o problema dos efluentes aéreos é substituído por questões como segurança e manejo do lixo atômico.

Impacto Associado a Tecnologias Avançadas de Cogeração

Para ilustrar a possibilidade de redução dos impactos ambientais de termelétricas com utilização de biomassa e tecnologias mais avançadas, apresenta-se a seguir um sumário de resultados de uma análise prospectiva voltada à avaliação da utilização, em larga escala, dos sistemas BIG-GT (*Biomassa - integrated / gas turbine*) (apresentados no item *Esquemas, principais tipos e configurações* deste capítulo), na geração de energia elétrica pelo bagaço de cana-de-açúcar. Ressalta-se que alguns dados e informações aqui utilizados podem ter sofrido alterações ao longo do tempo, mas não suficientes para alterar os principais resultados. Como consequência, esses resultados foram mantidos, pois o objetivo principal da apresentação efetuada não é desvirtuado.

São considerados os impactos na atmosfera, no solo, no ambiente biológico terrestre e em empregos. Três aspectos principais dos impactos na atmosfera foram analisados: o balanço de energia/emissão líquida de CO₂, metano e outros gases de efeito estufa e emissão de particulados.

Os resultados indicam a possibilidade de uma grande contribuição da nova tecnologia para redução das emissões de gases de efeito estufa, e

nal da biomassa que passa a ficar disponível para energia, as maiores eficiências de conversão e, num plano menos significativo, as emissões evitadas com a redução na queima de cana. Ao analisar resultados de projeções futuras é importante ter em mente as hipóteses e critérios básicos utilizados para desenho desse cenário futuro, o que não está sendo colocado em discussão, por fugir do escopo deste livro.

O balanço de energia e a emissão líquida de CO₂

Os sistemas BIG-GT levam à redução na queima de cana antes da colheita e à maior eficiência na produção de energia, apresentando, assim, uma grande influência na emissão líquida de CO₂. Os impactos principais (quando se compara com a situação atual) são:

- Agricultura:** quantidades muito maiores de biomassa estarão disponíveis após a queima, para substituir combustíveis fósseis. Esse efeito, no entanto, é parcialmente reduzido pelo maior consumo de óleo diesel para colher, carregar e transportar a cana com palha (não queimada);
- Indústria:** obtém-se maior eficiência de conversão de energia (comparando com as caldeiras de bagaço de cana, hoje), o que resulta em maior disponibilidade de energia final para substituir combustíveis fósseis.

Considerou-se como base a situação média do momento da análise, no final da década de 1990: toda a cana é queimada antes da colheita - 10t (MS)/ha colhido; autossuficiência em energia.

E, como situação futura: 55% da cana sem queimar, recuperação de 100% ou 50% da palha, desta cana sem queimar, dependendo da rota de colheita:

- Rota 1 - cana inteira com palha; 100% transportada à usina;
- Rota 2 - cana picada (extrator desligado); 100% de palha à usina;
- Rota 3 - cana picada (extrator ligado); enfardamento; 50% da palha à usina.

Diferenças no consumo de óleo diesel nas operações agrícolas, assim como diferenças devido ao maior volume de biomassa e maior eficiência de conversão nas diversas rotas, quando comparadas com a situação hoje, foram usadas para avaliar a emissão líquida de CO₂. Os resultados

Tabela 3.1 - Diferenças na emissão de CO₂ (emissões no futuro menos as emissões à época do estudo) - Uso parcial de palha e maior eficiência de conversão

ROTAS	DIESEL USADO NA AGRICULTURA (kg CO ₂ /t CANA)	SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL (kg CO ₂ /t CANA)	DIFERENÇA NA EMISSÃO TOTAL (10 ⁶ t CANA/ANO) (10 ⁶ t CO ₂ /ANO)	BRASIL: 300 X 10 ⁶ t CANA/ANO
Rota 1	+21	-139	-118	491
Rota 2	+7,3	-139	-132	-39,6
Rota 3	+2,3	-139	-137	-25,5

A última coluna mostra uma estimativa de redução (hipotética) de emissões de CO₂ atingível considerando-se a produção de todo o Brasil, com a tecnologia BIG-GT implantada de acordo com os cenários adotados. O potencial mostrado é muito grande, mesmo levando-se em conta que podem haver outras restrições devido à escala de produção.

Metano e outros gases de efeito estufa

As principais diferenças em outros gases de efeito estufa (especificamente metano, CO e NO_x) da situação tomada como base para uma utilização futura em larga escala de ciclo BIG-GT ocorrerão na área agrícola (queima da palha da cana).

Espera-se que a contribuição das diferenças nas emissões de NO_x e CO (caldeiras de bagaço e, no futuro, gaseificadores/turbinas a gás) seja pequena; mas sua melhor quantificação só será possível com maior conhecimento do processo de gaseificação que será adotado. Também a produção de metano pela palha no solo não parece significativa, assim como não deverá haver expressivas diferenças quanto às emissões de N₂O devido ao uso de fertilizantes nitrogenados.

Deve-se ressaltar que o impacto de colher cana sem queimar (mesmo que em apenas 55% da área total, porcentagem adotada no estudo, e que poderá ser aumentada na realidade futura) é importante, embora muito menor que o efeito da redução de CO₂.

Emissão de particulados

No tocante à emissão de particulados, os efeitos principais de introdução em larga escala de sistemas BIG-GT em usinas de cana-de-açúcar

- A mudança parcial para colheita de cana sem queimar levará à menor emissão de particulados na queima;
- Diferenças nas emissões de particulados de caldeiras a bagaço de cana atuais para ciclos de gaseificação/turbinas a gás.

Deve-se considerar ainda que, por um certo tempo, algumas usinas estarão recuperando a palha e utilizando-a em caldeiras de bagaço (não em ciclos BIG-GT). A situação tomada como base considera 100% de cana queimada e caldeira de bagaço com emissão média de 2,35 kg particulado/t cana.

A situação futura considera 45% de cana queimada; rotas diferentes com recuperação de 50% ou 100% da palha e caldeiras de bagaço operando com 600 mg/Nm³ de emissão de particulados. A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.2 - Diferenças nas emissões de particulados (situação futura menos a situação tomada como base) em kg particulado/t cana

	REDUÇÃO DEVIDO A MENOR QUEIMA DA CANA (kg/t CANA)	REDUÇÃO DEVIDO AO SISTEMA DE CONVERSÃO (kg/t CANA)	TOTAL (kg/t CANA)
Usinas com ciclos BIG/GT	0,38	-2,35	-1,97
Usinas com 100% palha recuperada	-0,38	-0,9	-1,28
Usinas com 50% palha recuperada	0,38	1,2	1,58

Outras verificações importantes sobre influência no solo são:

- Conservação do solo e erosão: testes de campo de infiltração e carry-over;
- Reciclagem de nutrientes com a incorporação da palha;
- Quantificação dos resíduos agrícolas e industriais; efeito da sua aplicação no solo;
- Impactos nas propriedades físicas do solo: desenvolvimento do sistema radicular, compactação do solo e matéria orgânica.

Uma Comparação entre Termelétrica a Óleo e a Gás Natural

Os principais resultados de uma comparação entre impactos am-

bases de dados internacionais, permitem a visualização não só das vantagens relativas do uso do gás natural, como também dos impactos mais relevantes das termelétricas. Como no exemplo anterior, ressalta-se que alguns dados e informações utilizados podem ter sofrido alterações ao longo do tempo, mas não suficientes para alterar os principais resultados.

Estudo de caso

Este estudo tem por objetivo a comparação, sob o aspecto ambiental, de dois combustíveis – gás natural e óleo combustível – usados para geração de energia elétrica. Trata-se de uma análise simplificada, que usa dados gerais de literatura especializada, focando os estágios mais importantes do ciclo de vida.

a) Unidade funcional e fronteiras dos sistemas

Para a análise, a unidade funcional foi fixada em 1 Tj de eletricidade produzida entregue à rede. Esse valor servirá de referência para normalização dos dados na fase de elaboração do inventário. Os ciclos de vida são apresentados nas Figuras 3.26 e 3.27.

Análise de inventário

O objetivo dessa fase é quantificar a energia e as matérias-primas requeridas, além das emissões de cada sistema. Para os objetivos deste estudo, utilizaram-se dados de uma fonte específica de dados para ACV referentes à Europa, uma vez que não se dispõe de dados completos para o Brasil. Nas fases seguintes, esse fato será considerado, e serão utilizados valores de normalização também referenciados à Europa.

A seguir são apresentados esquematicamente os fluxogramas dos sistemas em análise. As Figuras 3.26 e 3.27 apresentam, respectivamente, os fluxogramas do gás natural e do óleo combustível. Nelas estão incluídas as fases principais dos seus ciclos de vida.

As principais fontes de dados consultadas são: *ETH Energy version 2*, *Okoinventare für Energiesysteme*, ETH Zurich, 1994; *SimaPro 3.0 Eco-Indicator 95*, Pre Consultants, National Reuse of Waste research Program

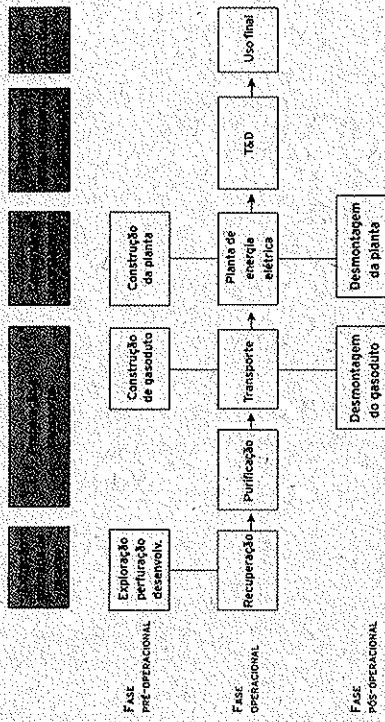


Figura 3.26 Fluxograma do ciclo de vida do gás natural

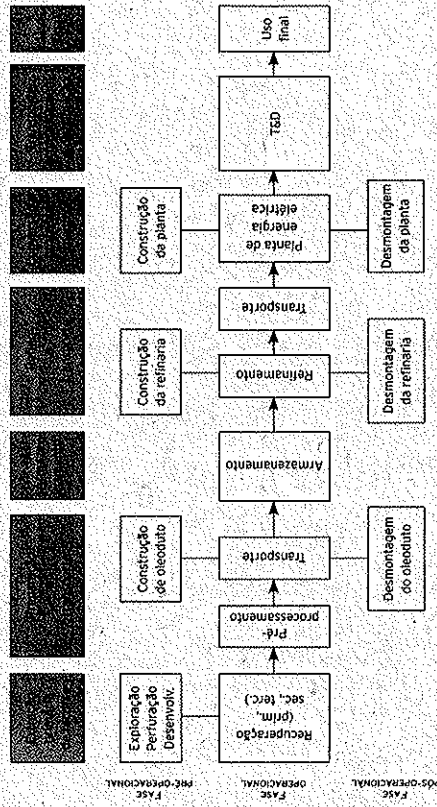


Figura 3.27 Fluxograma do ciclo de vida do óleo combustível

a) As categorias de impacto

Das categorias de impacto listadas a seguir, as duas últimas não foram