

## VERTENTES TECNOLÓGICAS AVANÇADAS COM POTENCIAL DE EMPREGO EM COGERAÇÃO

**José Antônio Perrella Balestieri**

UNESP – Campus de Guaratinguetá – Dep. de Energia., C.P. 205 – 12516-410 – Guaratinguetá – SP  
[perrella@feg.unesp.br](mailto:perrella@feg.unesp.br)

**Sergio Colle**

UFSC – Dep. de Engenharia Mecânica – C.P. 476 – 88040-090 – Florianópolis – SC  
[colle@emc.ufsc.br](mailto:colle@emc.ufsc.br)

***Resumo.** O planejamento de centrais de cogeração contempla os ciclos convencionais, que são aqueles comercialmente disponíveis; entretanto, novas tecnologias de geração têm sido apresentadas em literatura, sendo que algumas já se encontram na forma de protótipos ou modelos de demonstração. Observam-se publicações recentes visando estabelecer uma “taxonomia” que as classifique, bem como buscando traçar elementos indicativos – do ponto de vista técnico, econômico e ambiental – para uma orientação acerca dos principais nichos tecnológicos, buscando identificar oportunidades com maior probabilidade de sucesso e que devem ser investigadas. Este artigo apresenta uma revisão acerca das propostas de taxonomia apresentadas em literatura e identifica as principais vertentes tecnológicas com potencial de aplicação futura em cogeração, identificando as que são reconhecidas como detentoras de índices mais atrativos para sua utilização em médio e longo prazo.*

***Palavras chave:** novas tecnologias, cogeração, combustíveis, taxonomia.*

### 1. Introdução

A evolução recente de algumas áreas do conhecimento, tal como a que hoje se dispõe para computadores e sistemas de telecomunicações, ilustram a forma com que as novas tecnologias foram disseminadas de modo rápido e significativo; no campo da energia, a percepção dos níveis de mudança e seus impactos sobre a estrutura de geração existente, em geral definida como ‘convencional’, não se apresentou de forma tão categórica, tampouco se fez visível em igual intensidade se comparada com as demais questões apresentadas a título de exemplo, muito mais por conta das características técnicas e macroscópicas de sua utilização do que por um suposto baixo desenvolvimento tecnológico. Cabe destacar, nessa questão, a “invisibilidade da energia”, ou seja, “na evolução histórica do uso da energia, o ser humano não reconhece hoje a energia como uma mercadoria, que passa pela sua aquisição, uso e descarte; basta lembrar que as pessoas no passado tinham que comprar ou sair à procura de lenha para o cozimento, e que após o seu uso, as cinzas oriundas da queima da lenha tinham que ter alguma disposição final” (Dias, Mattos e Balestieri, 2001).

A esse respeito, Lenssen e Flavin (1996) descrevem o fato de as previsões energéticas oficiais e os estudos de especialistas da área revelarem, no início da década de 1990, um “surpreendente consenso” em identificar que nas décadas que se sucederiam apenas mudanças menores deveriam ocorrer, voltadas para sistemas ligeiramente mais eficientes, versões marginalmente mais limpas que as tecnologias de então, baseadas em combustíveis fósseis. Reconhecidamente, estudos estratégicos no campo do planejamento de sistemas energéticos enfrentam essa dificuldade: pagam-se as conseqüências de um estudo prospectivo, de longo prazo e sujeito a múltiplas incertezas que causam impacto no desenvolvimento tecnológico. Essas incertezas podem ser enfrentadas com o conhecimento conseqüente à pesquisa; de acordo com Gritsevskiy e Nakicenovic (2000), as tecnologias melhoram com a experiência acumulada pela escala de sua aplicação, ao passo que os custos e as incertezas tendem a declinar.

Larsson e Wene (1993) identificam quatro conjuntos de fatores que influem nas decisões acerca de um sistema energético, na fase do seu planejamento: as demandas por energia, as fontes energéticas disponíveis, as restrições decorrentes do meio físico (que podem ser tanto de restrição de área para empreendimentos energéticos quanto restrições ambientais), e o desenvolvimento de novas tecnologias de geração.

Não é objetivo do presente trabalho desenvolver uma discussão acerca de cada um dos tópicos anteriormente apresentados, ainda que os autores reconheçam a importância dos mesmos de forma indistinta, o que bem revela oportunidades localizadas de pertinente aprofundamento em diferentes campos do conhecimento; nesse contexto, é pertinente registrar a postura de Lenssen e Flavin (1996) com respeito ao impacto do uso de espaço físico para as tecnologias voltadas à geração de energia. Valores apresentados na Tab. 1 identificam que as maiores necessidades de área para geração de uma mesma unidade de energia devem ser avaliadas em face do valor e da utilidade do espaço físico; reafirma-se que o foco do trabalho está centrado no desenvolvimento de novas tecnologias, para o qual se apresentarão propostas de taxonomia e exemplos dos atuais desenvolvimentos tecnológicos.

Tabela 1. Necessidades de área para tecnologias de geração elétrica

Tecnologia	necessidade de área <sup>a</sup> (km <sup>2</sup> /ano/exajoule) <sup>c</sup>
plantação de biomassa dedicada á geração	125000 – 250000
grandes hidrelétricas	8300 – 250000
pequenas hidrelétricas	170 – 17000
centrais eólicas <sup>b</sup>	300 – 17000
centrais fotovoltaicas	1700 – 3300
centrais solares	700 – 3000
centrais a carvão betuminoso	670 – 3000
centrais a carvão lignita	6700
centrais com turbina a gás natural	200 – 670

Notas: (a) valor médio sobre vida útil de 30 anos para centrais térmicas, minas, etc. (b) a menor faixa para ventos inclui terrenos ocupados pelas turbinas e estradas de acesso; os números maiores incluem a área total do projeto; (c) 1 EJ (exajoule) = 10<sup>15</sup> kJ

Fonte: Lenssen e Flavin (1996)

## 2. A oportunidade do emprego de novas tecnologias

As novas tecnologias de geração são também chamadas de sistemas avançados de geração; de acordo com Lior (1997), ‘os sistemas de conversão energética são avançados se eles se revelam melhores do que os convencionais’, e nesse sentido devem ser atestadas melhorias em termos de:

- maior eficiência energética e/ou exergetica;
- menores emissões de espécies químicas e/ou energia;
- menores custos de investimento;
- menores custos operacionais e/ou especializações requeridas para sua operação;
- maior confiabilidade.

Vale considerar, como esse mesmo autor, ‘que as melhorias em certas categorias não devem causar deterioração inaceitável em outras, e que melhorias sinérgicas – pelas quais a melhoria em uma dada categoria resulta também em melhoria em outras categorias – são as mais desejáveis<sup>1</sup>. Uma análise das novas tecnologias, bem como uma avaliação preliminar acerca de suas potencialidades para o emprego em cogeração, carece de uma sistematização que busque evidenciar as características técnicas e econômicas de cada proposta; os resultados que se buscam obter com o presente trabalho deverão subsidiar futuros estudos prospectivos e tecnológicos de máquinas e sistema energéticos. Cabe, então, divisar conceitos que possibilitem a sistematização de uma investigação dessa natureza.

No contexto das novas tecnologias, Awerbuch *et al.* (1996) sinalizam para o fato de a literatura técnica nesse campo do conhecimento sugerir uma distinção entre o que seria um processo inovador incremental e um processo inovador radical. Conforme foi estabelecido por Herderson e Clark (1990), inovações radicais introduzem novos conceitos, que se destacam significativamente das práticas anteriores, ao passo que as inovações incrementais refinam e melhoram processos existentes. As inovações incrementais exploram o potencial de projetos estabelecidos e freqüentemente reforçam o domínio de mercado das empresas que detém a tecnologia para o seu desenvolvimento e implantação.

Acrescentando uma nova visão a esta questão, Grisevskyi e Nakicenovic (2000) estabelecem o fato de as tecnologias serem relacionadas umas às outras, de uma forma até freqüente, o que traz como consequência o fato de que melhoramentos em uma das tecnologias podem ser transferidos para as demais tecnologias correlatas; um exemplo bastante próximo seria considerar-se que melhorias desenvolvidas para um motor diesel automotivo devem se traduzir no aporte de melhorias em motores diesel estacionários. Melhorias em uma área que carregam benefícios para outras áreas são geralmente referidas como decorrentes de um efeito difusivo (*spillover*). Por outro lado, a implementação operacional de efeitos difusivos não é trivial, dado que não se dispõe de uma “taxonomia” de tecnologias, e quanto a essa questão chegam a argumentar que ‘uma espécie de “medida” ou “métrica” de proximidade ou distância tecnológica é requerida mesmo que uma taxonomia genuína não exista<sup>2</sup>.

Esses mesmos autores comentam que as propostas do trabalho de Foray e Grübler (1990) podem conduzir ao desenvolvimento de uma taxonomia de tecnologias em um futuro próximo; porém, para simplificar, estabelecem apenas dois tipos de efeito difusivo:

- o primeiro, indireto, por meio de conexões entre tecnologias e sistemas energéticos; seria o caso, por exemplo, de se associar “turbinas a gás mais baratas” com “eletricidade gerada mais barata”, o que deveria favorecer a demanda por tecnologias de uso final voltadas ao consumo de eletricidade para garantir-se o atendimento de um particular serviço energético comparado a outras alternativas;
- o segundo, direto, pela proximidade do ponto de vista tecnológico, na linha do exemplo já citado entre motores diesel ou células de combustível empregando metanol e hidrogênio.

Com isso, definem-se “grupos de tecnologias” (*clusters*) que podem levar a efeitos difusivos aproveitando o aprendizado sobre uma dada tecnologia para o emprego em outra.

Hasatani (1997) acrescenta à questão uma visão voltada ao emprego da energia, da fonte à exaustão, tomando por base a análise de degradação exergetica; a Fig. 1 apresenta a estrutura conceitual do fluxo de energia.

<sup>1</sup> Lior (1997), pp. 941.

<sup>2</sup> Gritsevskyi e Nakicenovic (2000), pp. 914.

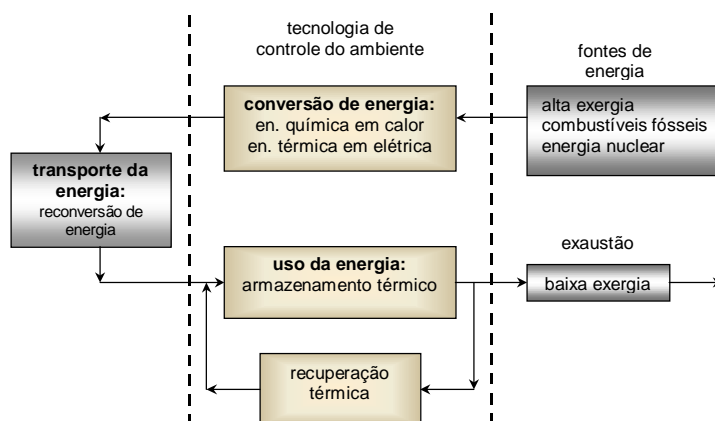


Figura 1. Diagrama conceitual do fluxo de energia.

Por essa proposta, inserem-se as novas tecnologias de geração objeto da análise deste trabalho no campo da conversão de energia, que inclui tanto a conversão da energia química dos combustíveis em energia térmica (combustão, fusão e fissão nuclear) quanto a conversão da energia térmica em energia elétrica (desenvolvimentos de turbinas a gás de alta temperatura, ciclos combinados de alta eficiência, geradores magneto-hidrodinâmicos, dentre outros). Numa abordagem voltada à evidência e caracterização preliminar de ciclos e seus componentes, Lior (1997) apresenta uma divisão das novas tecnologias<sup>3</sup>, considerando-se que as mesmas devem ser propostas com vistas a melhorar a eficiência de geração de potência e/ou reduzir emissões perigosas e procurando-se identificar as tecnologias em função de conceitos que impliquem em melhorias no sistema em estudo, a saber:

- a) tecnologias que elevam a temperatura superior do ciclo;
- b) tecnologias com melhorias no processo de combustão;
- c) tecnologias não limitadas pela eficiência de Carnot;
- d) tecnologias com menor capacidade de destruição exérgica;
- e) tecnologias que reduzem a temperatura inferior do ciclo;
- f) tecnologias que utilizam fontes de energia renováveis e amigáveis sob a ótica ambiental.

Algumas fontes de energia não se encontram limitadas pela temperatura alcançada pelo fluido de trabalho do sistema energético: aumentar a temperatura superior de um ciclo não encontra restrição devido ao potencial da fonte de energia em alcançá-la, mas principalmente em decorrência de indisponibilidade de materiais de engenharia e componentes que permitam resistir às mais altas temperaturas, que em geral se vêem acompanhadas pela elevação de pressão e outros efeitos que atuam em detrimento de sua habilidade de desenvolver suas funções.

Deve-se estabelecer, por fim, que uma mudança metodológica na avaliação dos benefícios e dos custos, bem como dos riscos associados a qualquer empreendimento energético (ou emprego de fontes de energia), pode ser a “pedra de toque”<sup>4</sup> para que novas formas de geração – tanto as novas tecnologias quanto as fontes alternativas de energia – sejam consideradas na análise de expansão do setor de geração. A esse respeito, Berry e Jaccard (2001) traduzem a discrepância entre os benefícios sociais e econômicos de fontes renováveis, com seus aludidos “elevados riscos financeiros”, relativamente às formas convencionais, altamente poluentes, em três principais razões:

- alguns Estados ou jurisdições provêm subsídios às formas de geração convencionais;
- os custos totais de poluição – as externalidades – não são incluídos nos custos financeiros de fontes convencionais de geração de eletricidade;
- fontes renováveis são geralmente associadas a novas tecnologias, de maior custo de investimento que decrescem com a comercialização devido a economias decorrentes da aprendizagem sobre as mesmas e economias de escala na sua manufatura.

A Fig. 3 traduz tais razões de forma ilustrativa. À esquerda, a partir de uma perspectiva de análise de investimento com vertente puramente econômica, muitas das alternativas renováveis se mostram mais caras que as formas convencionais de geração. À direita, apresenta-se o impacto potencial de se considerarem os três fatores acima percorridos, levando-se em conta uma perspectiva de custo com cunho social de longo prazo; se os subsídios forem removidos e as externalidades incluídas, os custos das fontes de geração convencionais podem crescer substancialmente; ao mesmo tempo, os custos das formas de geração renováveis poderiam diminuir em razão de sua maior comercialização. Por essa lógica, é razoável pensar que a forma de abordagem da inserção de novas tecnologias no planejamento da expansão da geração elétrica pode determinar a aceitação ou a rejeição das mesmas em estudos de médio e longo prazos.

Vale resgatar, ainda, algumas das conclusões relativas às novas tecnologias, apresentadas no trabalho de Gritsevskiy e Nakicenovic (2000), pela sua importância na questão aqui tratada e em análises futuras nesse tema em particular:

<sup>3</sup> Uma forma de taxonomia?

<sup>4</sup> Chama-se “pedra de toque” àquela que é empregado pelos joalheiros com ácido para determinar o valor e a pureza do ouro.

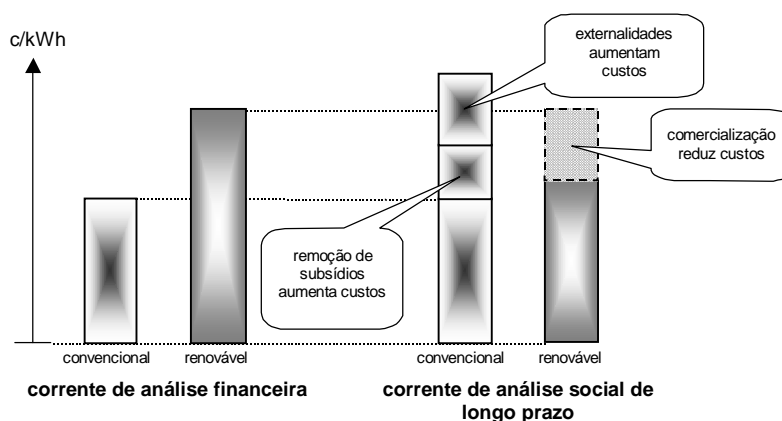


Figura 3. Geração convencional e por renováveis: comparação econômica e social.

- *‘Sob incerteza as decisões de investimento de curto prazo em novas tecnologias são mais importantes para a determinação da direção do desenvolvimento de longo prazo de sistemas energéticos do que as decisões que serão tomadas posteriormente, em direção ao fim do horizonte de tempo considerado’;*
- *Decorre da conclusão anterior que ‘a fase mais dinâmica no desenvolvimento dos futuros sistemas energéticos irá ocorrer durante as próximas décadas e que será durante esse período que haverá uma elevada liberdade de escolha sobre as futuras tecnologias, e muitas dessas escolhas irão conduzir a altos efeitos de aprendizado de efeito difusivo para tecnologias correlatas’;*
- *Além disso, concluem que ‘uma implicação [em termos de] política [energética] que pode ser feita baseada na dinâmica de surgimento e diferentes direções do desenvolvimento de sistemas energéticos nesta análise é que os futuros esforços e investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento em novas tecnologias devem ser distribuídos entre tecnologias correlatas ao invés de serem dirigidos a apenas uma tecnologia do “grupo de tecnologias” identificado, ainda que ela dê mostras de vir a ser a “vencedora”’.*
- *Por fim, citam como outra implicação que ‘é melhor não dispensar esforços e investimentos tecnológicos em Pesquisa e Desenvolvimento sobre um portfólio amplo de futuras tecnologias, sendo melhor focar [o objeto dessas práticas] em tecnologias (correlatas) que possam formar grupos de tecnologia’.*

### 3. A combustão como caminho de novas tecnologias

É fato que todo processo de combustão implica, necessariamente, na eliminação para a atmosfera de parcelas consideráveis de elementos que causam impacto sobre o meio ambiente; claro está, portanto, que todo esforço desenvolvido visando-se a melhoria da eficiência da combustão é bem-vinda. Sondreal *et al.* (2001) dizem crer que uma atenção adequada à qualidade do combustível é a chave para o sucesso na aplicação de novas tecnologias de conversão energética (p. 8); fazem também uma apresentação bastante oportuna acerca da questão, aqui reproduzida (p. 7, abstract): *‘Os avanços na tecnologia de combustão somente serão adotados quando reduzirem custos e puderem ser implementados com risco técnico aceitável. Afora o risco técnico, as futuras decisões acerca da expansão de novas centrais de potência serão influenciadas principalmente pelas tendências de custo dos combustíveis, da eficiência e custo de investimento em novas tecnologias de geração e das políticas institucionais e ambientais que incluam possíveis taxas para emissão de carbono. A escolha do combustível e da tecnologia de geração para novas centrais de potência é influenciada por uma combinação crescentemente complexa de fatores inter-relacionados:*

- *políticas governamentais atuais e futuras acerca de re-estruturação e desregulamentação de concessões, e regulamentações ambientais que no futuro podem incluir taxas para emissões de carbono;*
- *fatores macroeconômicos como proximidade aos centros consumidores, linhas de transmissão elétrica, custo de investimento da unidade, custo do combustível empregado e estabilidade de preços dos combustíveis;*
- *o estado de desenvolvimento de novas tecnologias de geração e de controle ambiental, bem como os benefícios e riscos associados ao seu emprego, que é fortemente relacionado com as características do combustível’.*

Os ciclos térmicos convencionais de geração elétrica são dependentes de combustíveis fósseis; a despeito da crescente escalada do gás natural, nos Estados Unidos o carvão ainda é o mais utilizado. A principal fonte de energia de origem renovável associada aos processos de combustão é a biomassa, queimada só ou em conjunto com outros combustíveis, na forma sólida ou gasosa. O termo **biomassa** diz respeito a um conjunto de resíduos com potencial de emprego em sistemas térmicos; constituem biomassas os resíduos agroindustriais (biomassas vegetais), os resíduos sólidos municipais (lixo urbano) e os produtos de “florestas energéticas” e de florestas nativas (fortemente contestada).

O argumento mais forte para o emprego da biomassa está no fato de se constituir em fonte imediata e relativamente barata de energia, com forte conteúdo ambiental em alguns casos (e de acordo com considerações específicas), razoável poder calorífico<sup>5</sup>. Os **resíduos sólidos municipais** constituem-se em problema sério nas grandes

<sup>5</sup> conforme Larson (1993), o poder calorífico inferior está entre 15000 kJ/kg (resíduos industriais) e 20000 kJ/kg (muitas espécies vegetais) (pp. 570).

idades, para as quais o aterro e a incineração são as soluções mais comumente propostas; países como o Japão, que possuem uma elevada taxa de ocupação do espaço físico, são os que se encontram mais adiantados no tratamento da questão do lixo urbano (Holanda e Balestieri, 1999; Miranda e Hale, 1997). A destruição do lixo urbano ainda coexiste com a geração de cinzas, tanto aquela gerada no cinzeiro da fornalha (*bottom ash*) quanto a que está presente nos gases de exaustão (*fly ash*), que exigem controle e disposição final. Numa unidade típica, as cinzas representam 10% do volume de resíduos sólidos iniciais, ou cerca de 24% em peso, sendo que Suécia e Alemanha reciclam a maior parte das cinzas produzidas na forma de agregados para pavimentação ou cobertura de aterros, por exemplo, ao passo que os Estados Unidos reciclam apenas 2% dos nove milhões de toneladas anualmente produzidas (Miranda e Hale, 1997).

O **aterroamento de resíduos sólidos municipais** é outra alternativa; no entanto, por ser um sistema aberto e sujeito a condições dinâmicas em termos de quantidade e composição de percolados e gases, sua estrutura não pode ser considerada constante exceto por limitados períodos de tempo. A taxa de emissão de gases varia em função do tempo, podendo-se assumir *a priori* como exponencialmente decrescente (Finnveden *et al.*, 1995). O gás produzido em aterros consiste principalmente de metano, que possui um potencial vinte e cinco vezes<sup>6</sup> maior que o dióxido de carbono de causar danos ambientais por efeito estufa<sup>7</sup>; assim, para que se reduza tal dano, muitos aterros praticam a queima em *flare* do gás antes de libera-lo para a atmosfera (Miranda e Hale, 1997).

Em termos de comparação dos custos de produção, demonstram ainda que o aterro é uma opção mais barata que o gerenciamento dos resíduos em geração de energia<sup>8</sup>; a título de exemplo, para valores calculados relativamente aos Estados Unidos, aterros apresentam custos entre 14,33 – 54,01 US\$/t, ao passo que a geração térmica com resíduos se situa na faixa entre 65,40 – 130,79 US\$/t, enquanto na Suécia têm-se aterros com custos entre 15,38 – 23,08 US\$/t e a geração com resíduo com 53,85 – 61,54 US\$/t. Segundo o resultado da pesquisa de Miranda e Hale (1997), as centrais térmicas com resíduos sólidos municipais podem ter por objetivo gerar energia ou tão somente gerenciar a existência desse recurso, concluindo por estabelecer que:

- nas condições analisadas a produção de energia a partir de resíduos não compete com a produção de energia com combustíveis fósseis; os custos de produção com resíduos podem ser de duas a cinco vezes superiores aos resultantes da geração com combustíveis fósseis. Contudo, a escolha por essa alternativa se dá não pelas necessidades de energia, mas como uma opção de gerenciamento de resíduos, uma vez que a incineração de resíduos significa não apenas produção associada de energia mas também redução da área física necessária para sua alocação, o que em peso representa uma redução de 75%;
- do ponto de vista sócio-ambiental, a incineração de resíduos deve ser avaliada com base nos custos das externalidades; os custos dos danos ambientais, normalmente não computados na estrutura formal de custos, podem alterar de modo significativo a atratividade desses empreendimentos.

A pesquisa acerca do aproveitamento de biomassas de forma geral, e em especial as biomassas vegetais, não é recente; no entanto, com a sempre presente preocupação com o declínio das reservas de petróleo, carvão e gás natural e a instabilidade de preços que se verifica ao longo das últimas três décadas, têm-se buscado encontrar alternativas energéticas, com especial ênfase na proposição de tecnologias renováveis (Küçük e Demirbas, 1997). A biomassa vegetal seria fonte imediata e relativamente barata para o desenvolvimento de uma indústria energética ambientalmente favorável, ainda que para tanto restem questões passíveis de discussão. Uma delas, bastante pertinente por sinal, diz respeito à aceitação da condição de “energia verde” para a biomassa vegetal.

#### 4. Tecnologias padrão Brayton

A partir da proposta de taxonomia apresentada, identificam-se vertentes tecnológicas baseadas em conjuntos a gás e associadas à tecnologia dos ciclos padrão Brayton; para tanto, são apresentadas configurações presentes na literatura, propostas e/ou efetivamente testadas para emprego em geração térmica e cogeração. Numa revisão crítica acerca das turbinas a gás em ciclos avançados, Heppenstall (1998) descreve uma taxonomia particular para esses conjuntos e faz a distinção entre os ciclos de recuperação e ciclos *bottoming*, sendo que o calor recuperado é empregado no mesmo conjunto a gás nos primeiros ou de forma independente do ciclo de potência, para os segundos.

Dentre os ciclos de recuperação, faz menção às seguintes estruturas:

- turbinas a gás com recuperação térmica
- turbinas a gás com injeção de vapor
- turbinas a gás evaporativas (ciclo de ar úmido)
- turbinas a gás com recuperação química

As **turbinas a gás com recuperação térmica** apresentam eficiências da ordem de 42%; com o aumento da taxa de compressão há um aumento da temperatura do ar na saída do compressor, mas com redução da temperatura de exaustão e, dessa forma, as condições limites para a troca térmica podem ser alcançadas. O resfriamento intermediário reduz o problema da transferência de calor e permite uma recuperação com alta eficiência na turbina. Uma discussão técnica mostra que o emprego de regeneradores, ao invés de recuperadores, poderia garantir maior eficiência com menores taxas de compressão, porém com necessidade de turbinas relativamente maiores (Fig. 4).

<sup>6</sup> de acordo como Tillman (2000), 1 t<sub>CH<sub>4</sub></sub> é equivalente a 11 t<sub>CO<sub>2</sub></sub> em termos de impactos de aquecimento global (pp. 369)

<sup>7</sup> considera-se que contribuam diretamente para o “efeito estufa” o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o metano (CH<sub>4</sub>).

<sup>8</sup> aterros devem ter emissões e chorume continuamente monitorados na operação e até 30 anos após ser desativado (Miranda e Hale, 1997).

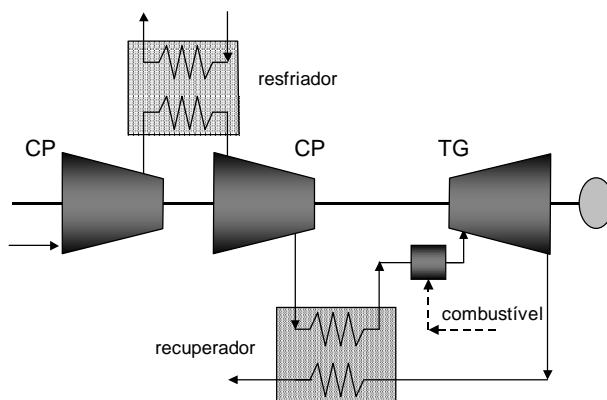


Figura 4. Turbina a gás com recuperação térmica

Uma outra alternativa de melhoria de eficiência e de emissões é a injeção de vapor ou água na câmara de combustão do conjunto a gás, no originalmente denominado ciclo Cheng, em face de quem o concebeu (Joshi e Lee, 1996), mas que vem sendo mais conhecido como **turbina a gás com injeção de vapor** ou simplesmente **STIG**<sup>9</sup> (*steam injection gas turbine*), conforme ilustrado na Fig. 5. Turbinas a gás com injeção de vapor representam, de fato, uma alternativa eficiente para o incremento do fluxo de massa e da potência gerada em um ciclo; conceitualmente, o processo de injeção consiste em expandir o vapor junto com o ar na mesma turbina ao invés de desviá-lo para uma turbina a vapor. A injeção de vapor em turbinas a gás tem sido empregada de modo a aumentar a eficiência dos ciclos em cargas parciais, uma vez que o vapor pode deslocar a demanda de combustível na câmara de combustão.

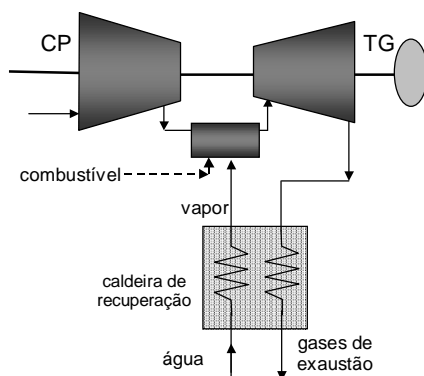


Figura 5. Ilustração de sistema STIG

As **turbinas a gás de ar úmido (HAT, humid air turbines)** são, de acordo com Horlock (1998), variações do ciclo básico de sistemas evaporativos, e a história desse ciclo é longa, ainda que venha sendo considerado apenas mais recentemente. Conforme Heppenstall (1998), os ciclos HAT são próximos do ciclo STIG: neste, vapor é gerado numa caldeira de recuperação, ao passo que no ciclo HAT água líquida é injetada no fluxo de ar que sai do compressor com temperatura elevada pela termodinâmica do processo, resultando na mistura de ar úmido decorrente de sua evaporação que é aquecida pelos gases de escape da turbina, em trocador de calor, antes de entrar na câmara de combustão (Fig. 6).

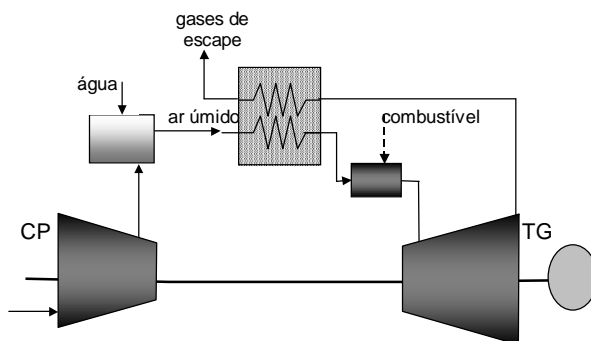


Figura 6. Turbina a gás de ar úmido (HAT)

<sup>9</sup> A *Ishikawajima-Harima Heavy Industries* apresenta disponíveis para comercialização os modelos STIG-LM1600, de 16,9 MW, STIG-LM2500, de 27,99MW, e STIG-IM5000, de 51,16 MW (Biasi, 2000, pp. 71).

Nas considerações de Heppenstall (1998), o ciclo STIG depende da pressão do vapor ser maior que a de saída do compressor para que possa operar, e mesmo em conjuntos com maiores taxas de compressão a temperatura de saturação do vapor deve ser inferior a 200°C. No entanto, há uma consideração técnica importante relativamente à caldeira de recuperação empregada nessas configurações: como a temperatura do vapor injetada no ciclo STIG deve ser elevada até valores próximos daqueles presentes na câmara de combustão – algo na ordem de 1250°C – há vantagens em se manterem baixas temperaturas mínimas de aproximação (entre gases de exaustão e água em processo de formação de vapor) caldeira de recuperação. Contudo, como a ebulição é um processo que se ocorre com temperatura constante, elevadas temperaturas do vapor estão necessariamente associadas a um baixo nível de recuperação térmica, isto é, a temperatura do vapor deve ser mantida relativamente baixa para que se maximize a recuperação térmica do calor dos gases de escape. Tais dificuldades limitam a eficiência máxima teórica do ciclo STIG; na prática, o autor aponta que a turbina GE LM5000, projetada para 30 MW com eficiência de 36%, tem sua potência elevada para 42 MW e sua eficiência elevada para 42% pela injeção de vapor.

É dentro desse contexto que o ciclo evaporativo pode significar uma melhoria tecnológica; continuando a lógica da exposição de Heppenstall (1998), as limitações da caldeira de recuperação podem ser reduzidas com sistemas de múltiplas pressões, de modo que as temperaturas de saturação sucessivas se aproximem daquelas dos gases de exaustão com uma aproximação próxima da condição reversível. Os sistemas de injeção de vapor não podem acomodar fluxos de vapor com diferentes pressões sem uma mudança substancial no projeto do conjunto a gás, porém os ciclos de evaporação superam tal dificuldade com os mesmos benefícios, ou seja, maior fluxo de massa na turbina e aumento do calor específico do fluido de trabalho. Fontes diversas sinalizam para eficiências entre 45-46% com potência específica cerca de 20% inferior ao do ciclo STIG básico. A geração de água com certo grau de pureza se torna, em consequência, uma necessidade em ambos os ciclos, STIG e HAT; de acordo com Heppenstall (1998), o ciclo STIG demanda de 1,1 a 1,6 kg/kWh de água de elevada pureza, além do fato de o custo de sua produção representar cerca de 5% do custo de investimento da unidade. Além disso, verifica-se um aumento das névoas de vapor eliminadas pelas chaminés. Gallo (1997) discute a questão do emprego de água desmineralizada em diversos ciclos face ao seu desempenho.

É interessante apresentar, neste contexto, a proposta de Nakhmkin *et al.* (1996) sobre uma variação desse ciclo, o **CHAT** (*cascaded humidified advanced turbine*), que apresenta por distinção do HAT o fato de apresentar o processo de compressão em múltiplas etapas, resfriamento intermediário e reaquecimento, além da umidificação – característica comum a ambos. De acordo com a Fig. 7, o ar é comprimido da condição ambiente para a condição LP, daí para o resfriador e para o compressor intermediário IP num segundo eixo. A descarga desse compressor é dirigida para um segundo resfriador e entra no compressor de alta pressão HP; daí é enviado para o umidificador, onde o ar é umidificado e pré-aquecido. Do saturador o ar é enviado para o recuperador para um posterior aquecimento e daí para a câmara de combustão, no qual combustível é acrescentado, para expansão nas turbinas de alta e baixa pressão. Segundo os autores, esse ciclo teria custo de investimento 15 a 20% inferior ao de um ciclo combinado (cerca de 350 US\$/kW), assim como custo de operação e manutenção cerca de 6% inferior, além de eficiência na faixa de 54-55%.

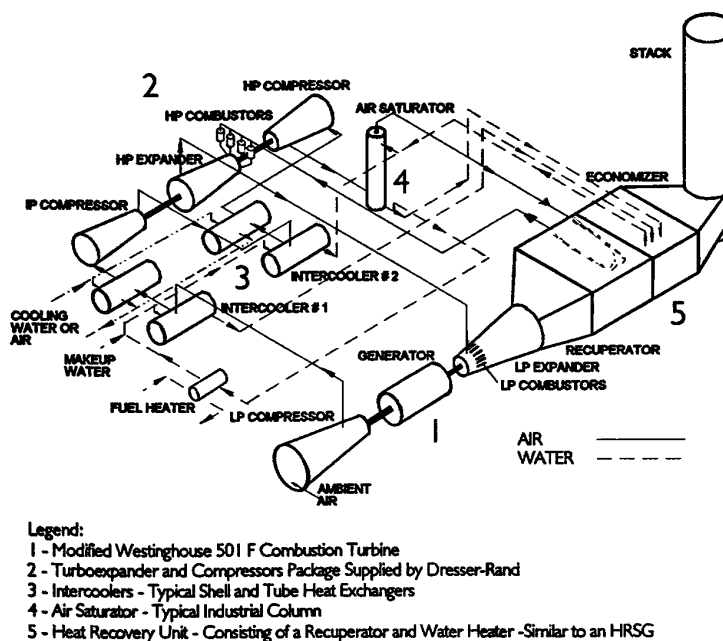


Figura 7. Ciclo CHAT

De acordo com Abdallah e Harvey (2001), as **turbinas a gás com recuperação química** (**CRGT**, *chemically recuperated gas turbine*) constituem um dos conceitos de ciclos avançados que contam com grande interesse em sua avaliação. Do ponto de vista operacional, gás natural é misturado ao vapor gerado e levado para o reformador, onde a mistura é aquecida pelos gases de exaustão da turbina a gás e uma reação exotérmica ocorre entre o metano e o vapor,

conforme Fig. 8. Um aspecto interessante apresentado por esses autores, (Abdallah e Harvey, 2001) diz respeito à necessidade de a reação exotérmica em questão necessitar da presença de níquel como catalisador, tendo por resultado CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, vapor excedente e metano não convertido. Conforme Carcasci, Facchini e Harvey (1998), a completa conversão do metano pode aumentar o poder calorífico efetivo do combustível em até 30%; dessa forma, a mistura vapor/metano<sup>10</sup> absorve calor tanto termicamente (quando é aquecido) quanto quimicamente (pela reação endotérmica), resultando em um potencial de recuperação energética superior ao procedimento convencional para tanto.

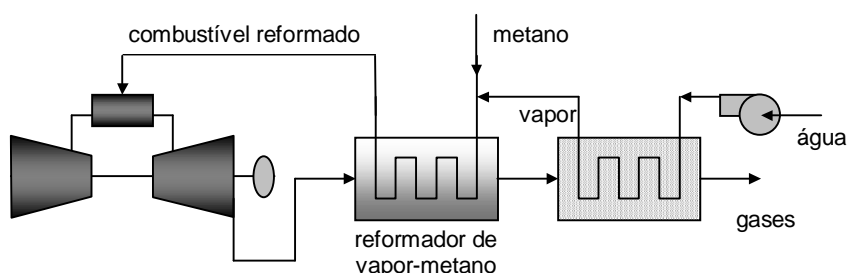


Figura 8. Turbina a gás com recuperação química (CRGT)

A associação de conjuntos a gás com caldeiras convencionais tendo por fornalha incinerador de resíduos sólidos municipais, de acordo com a análise de Otoma *et al.* (1997), é uma possibilidade a ser considerada. A base para a propositura de tal configuração está no ciclo combinado gás-vapor, sendo que a caldeira de recuperação deste é substituída pela estrutura de geração de vapor composta de incinerador/caldeira/superaquecedor daquele, porém com a inclusão do recurso da queima compartilhada de gás natural (Fig. 9).

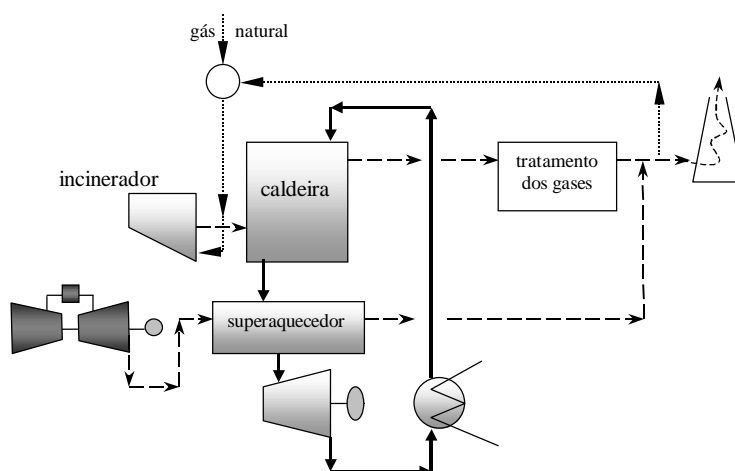


Figura 9. Configuração de ciclo combinado com queima de RSM e *co-firing* de gás natural

Os processos de gaseificação se traduzem, em termos tecnológicos, em sistemas conhecidos na literatura como **IGCC**, ou **ciclo combinado com gaseificação integrada** (*Integrated Gasification Combined Cycle*). A gaseificação associada a tais ciclos tem sido conduzida principalmente para biomassa (vegetais ou resíduos) e carvão, o primeiro por sua característica de fonte energética renovável e a segunda pela sua abundância e emprego extensivo nos Estados Unidos, dando origem aos termos derivados, **BIG-CC** (*biomass*) e **CIG-CC** (*coal*).

A composição do sistema **BIG-GT** com o sistema **STIG** resulta no sistema **BIG-STIG**, tecnologia esperada para penetração comercial em horizonte de médio prazo, cuja ilustração consta da Fig. 10; um sistema equivalente, imaginado para longo prazo, seria o sistema **BIG-ISTIG**, com resfriamento intermediário. De acordo com Larson (1993), os sistemas **BIG-STIG** são caracterizados pela elevada eficiência e baixo custo esperado de investimento na faixa entre 5 e 100 MW, ou ao menos competem com sistemas a vapor convencionais operando em modo de cogeração.

Uma interessante aplicação da indústria petroquímica e que utiliza ciclos combinados é a geração de energia associada à produção e distribuição de gás natural liquefeito (LNG) apresentada por Hisazumi, Yamasaki e Sugiyama (1998); um complexo sistema como o da Fig. 11 é formado pelo ciclo combinado composto por uma turbina a gás (TG) e uma turbina a vapor (TV), tendo gás natural por combustível, e por um ciclo de geração de potência LNG composto por uma turbina de fluorcarbono – *freon* (FR-T), e turbinas de gás natural (NG-HT e NG-LT), que fazem uso do calor latente de condensação do vapor exaustado e do calor sensível dos gases de exaustão como fontes de calor.

<sup>10</sup> a taxa típica vapor/metano está na faixa entre 3 e 5 (mol H<sub>2</sub>O/molCH<sub>4</sub>) para reformadores de vapor industriais, largamente utilizados para produção de hidrogênio para síntese de amônia ou metanol (Carcasci, Facchini e Harvey, 1998).



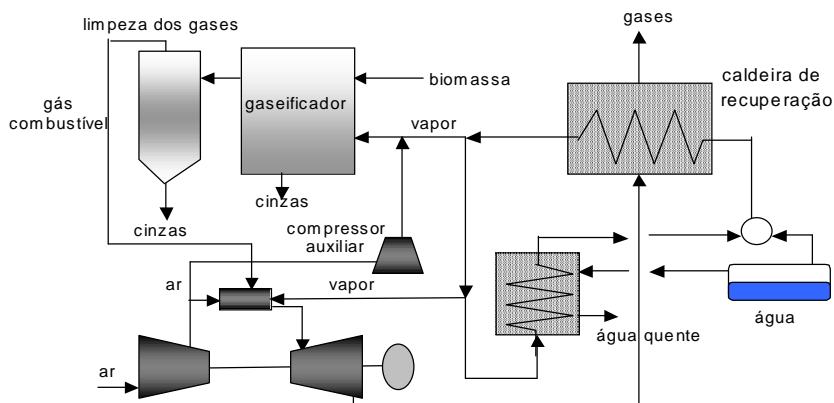


Figura 10. Unidade BIG-STIG

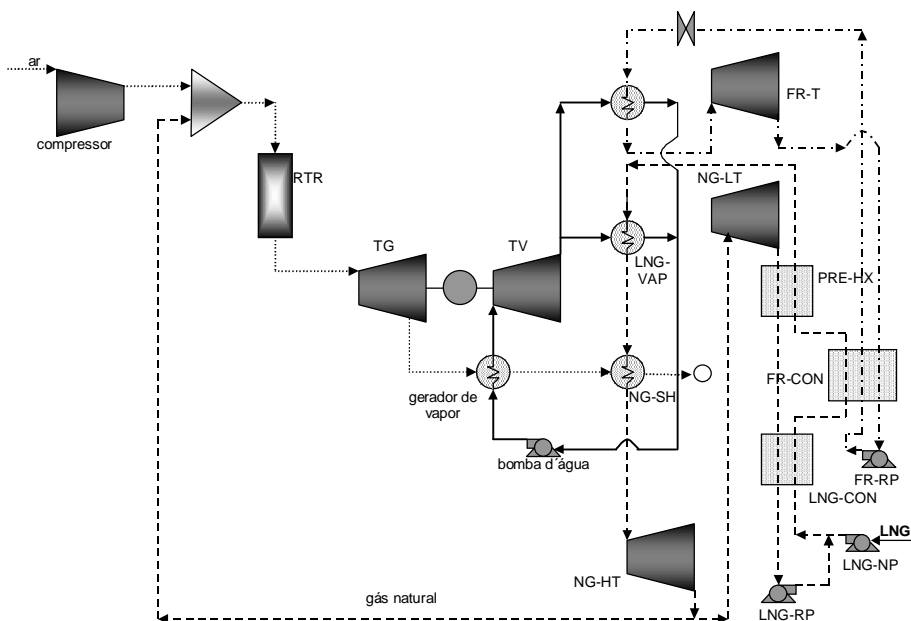


Figura 11. Ciclo combinado associado ao processamento de LNG

O **ciclo Kalina** consiste em um sistema com múltiplos componentes no que diz respeito ao fluido de trabalho, em que água e amônia circulam juntas em um mesmo fluxo; de acordo com Heppenstall (1998), esse sistema seria o arranjo com possibilidade de superar as limitações termodinâmicas e de transferência de calor da eficiência das caldeiras de recuperação do ciclo STIG pelo emprego de uma mistura água e amônia. Conforme a Fig. 12, há dois estágios de condensação: no primeiro estágio, o fluxo de gases de exaustão de uma turbina a gás é completamente absorvido em base contínua por um fluido secundário na fase líquida e o calor de absorção é dissipado na água de resfriamento do condensador. O fluido secundário é uma mistura água-amônia de composição diferente daquele do fluxo de saída da turbina; seguindo o processo de absorção, a mistura do fluido secundário mais o fluxo de saída da turbina é pressurizada. Como fase líquida está sendo comprimida, pouca potência de bombeamento é necessária; o fluido pressurizado é aquecido pelo fluxo de saída da turbina e leva o fluido de trabalho da turbina à ebulição.

## 5. Outras tecnologias envolvendo combustão

Neste item discutem-se propostas diversas das anteriores e que encontram-se em um estágio de implantação distinto ao daqueles. Dentre tais tecnologias, as células de combustível são preliminarmente citadas, face às iniciativas para que se tornem comercialmente disponíveis em larga escala nos próximos anos; por outro lado, serão aventadas outras iniciativas, como as que utilizam o conceito da magneto-hidrodinâmica.

Como tecnologia, as células de combustível devem ser entendidas como componentes de um sistema, unidades que operam por si próprias; a tecnologia de **células de combustível baseada em ácido fosfórico (PAFC, phosphoric acid fuel cell)** é aquela que se encontra mais próxima da condição de comercialização, devendo competir com outras tecnologias de geração. Células de eletrólitos poliméricos (**PEM, polymer electrolyte**), de **óxido sólido (SOFC, solid oxide fuel cells)** e de carbonato fundido (**MCFC, molten carbonate fuel cells**) vêm sendo testadas em escala comercial em unidades pilotos na Europa e Estados Unidos (Lunghi, Ubertini e Desideri, 2001).

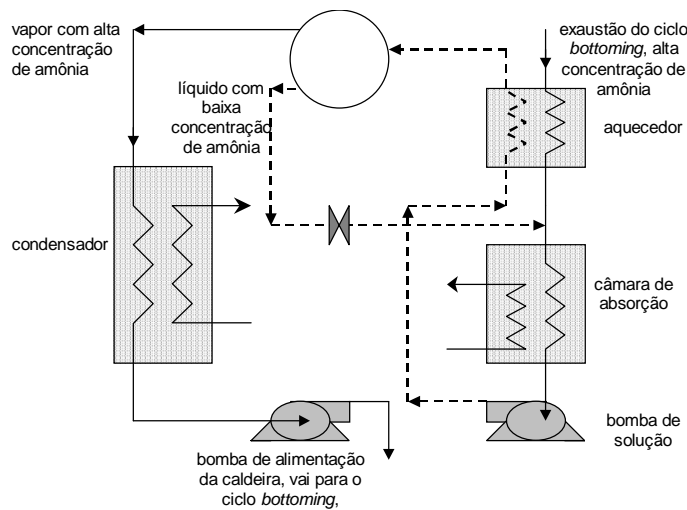


Figura 12. Ciclo Kalina

Muito embora os custos de investimento atuais sejam bastante elevados (ordem de 3000US\$/kW), de acordo com Stambler (2000) são esperadas em 2003 pequenas unidades para aplicações comerciais, na faixa de 200 kW, operando na faixa de 1000 a 1500 US\$/kW, com 50 a 60% de eficiência; os programas de P&D prevêem para 2004 o emprego de sistemas híbridos MCFC-GT na faixa de 300 kW com eficiência superior a 75% e custo inferior a 1300 US\$/kW; o Departamento de Energia americano (DOE) estabelece projeção para 2010 com o emprego de células de combustível em escala industrial custando cerca de 400 US\$/kW (para unidades híbridas) e com eficiências próximas de 80%.

A proposta apresentada em Lunghi, Ubertini e Desideri (2001), de uma unidade em ciclo combinado MCFC-GT, no qual a célula de combustível é tomada por unidade superior e o conjunto a gás como unidade inferior, é apresentada na Fig. 13. O gás natural não pode ser consumido diretamente pela célula de combustível, uma vez que apenas hidrogênio é capaz de reagir com o íon  $\text{CO}_3^{2-}$ ; o metano que entra no anodo é internamente reformado com vapor, produzindo hidrogênio e monóxido de carbono pela reação  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ .

A oportunidade do aproveitamento de **magneto-hidrodinâmica** na geração de energia foi explorada por Kayukawa (2000); o ciclo aberto MHD (*magneto hydrodynamics*) é a máquina térmica de mais elevada temperatura, alcançada pelo escoamento de um fluxo de alta temperatura no canal do MHD, e com a capacidade de alcançar elevadas eficiências termodinâmicas. No entanto, assinala o autor, a temperatura de trabalho deve estar limitada a 2300 K de modo que o gás permaneça eletricamente condutivo. O aproveitamento energético em cascata característico da geração MHD compreende diferentes formas de ciclos combinados, sendo que o canal do MHD é responsável pela unidade superior; no artigo em questão, o autor explora seis diferentes configurações, sendo que em duas delas o combustível utilizado é carvão e nas demais gás sintético é gerado para injeção e queima no canal. A gaseificação do carvão é explorada tendo tanto a queima do próprio carvão quanto o aproveitamento da mistura carvão/gases de exaustão do MHD; a associação do MHD com ciclo a vapor convencional e uma cascata MHD/gaseificação/turbina a gás/turbina a vapor é também explorada. A Fig. 14 apresenta a configuração mais simples proposta, envolvendo o sistema MHD e uma unidade inferior com gerador de vapor e turbina a vapor.

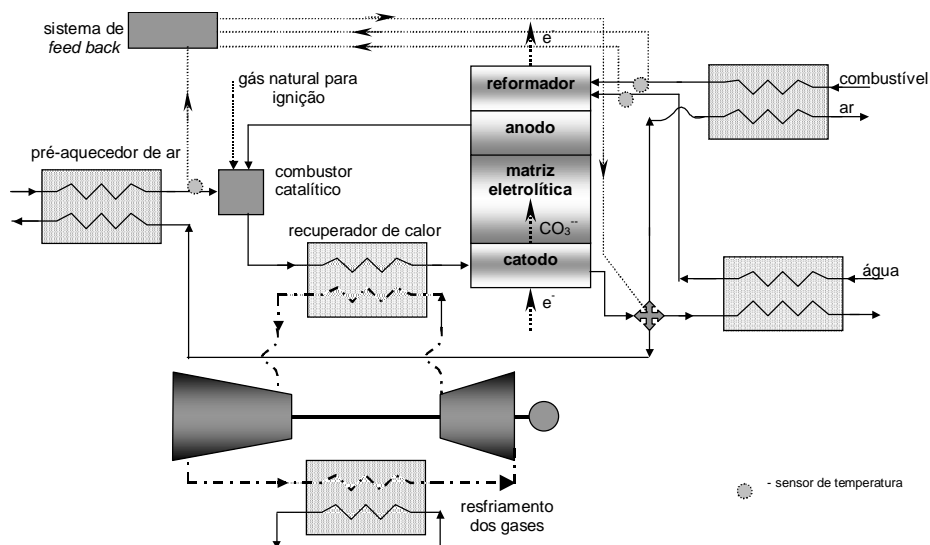


Figura 13. Ciclo combinado MCFC-GT com célula de combustível como unidade superior

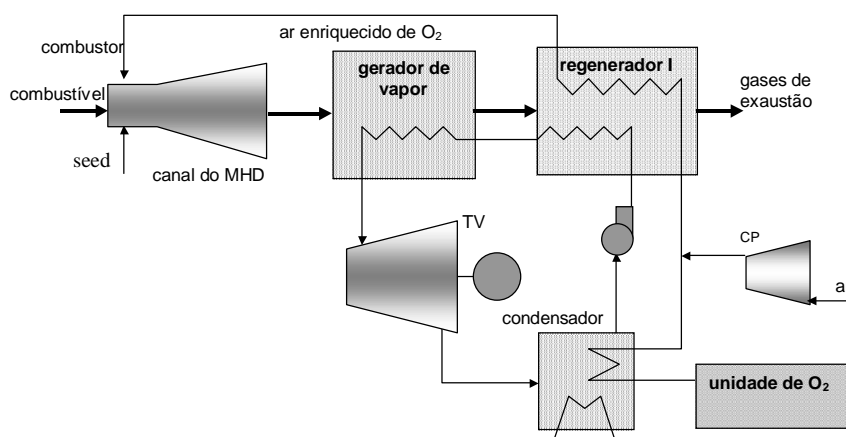


Figura 14. Ciclo MHD associado a ciclo a vapor convencional

Os resultados apresentados são ainda exploratórios; fala-se em eficiências de 61 a 63% para esses sistemas; a remoção de  $SO_x$  pode ser alcançada automaticamente nos casos de sistemas com canal de MHD como unidade superior, mas nos casos em que conjuntos a gás estão nessa condição unidades de dessulfurização devem ser considerados.

## 6. Conclusões

No presente trabalho buscou-se apresentar as principais tecnologias de geração com potencial de aplicação futura em configurações voltadas à prática da cogeração. A questão de fundo da questão deve se basear nas eficiências e custos de investimento de cada uma das vertentes tecnológicas, uma vez que apenas parte das mesmas se encontra estruturada na forma de protótipos e/ou montagens demonstrativas; observou-se, além disso, que em alguns casos as propostas são variantes derivadas de propostas conceituais.

Das tecnologias avaliadas, há uma clara sensação acerca da continuidade do desenvolvimento de configurações avançadas de ciclos a gás e combinados, assim como do grande potencial de penetração das células de combustível em futuro bastante próximo (Lunghi, Ubertini e Desideri, 2001, falam em cerca de 10 anos para que unidades de demonstração MCFC em escala comercial alcancem 100% de sucesso); também são divisados cenários para o emprego de energia eólica, solar e fotovoltaica para produção de energia primária no ano 2025 em níveis compatíveis ao que a energia nuclear gerava em meados da década de 1990 (Lenssen e Flavin, 1996, pp. 775).

Cabe, por fim, assinalar que não devem ser alimentadas ilusões nessa questão, e fatores já citados quanto à disponibilidade energética de cada fonte, dos recursos físicos e econômicos necessários para sua consecução e a necessidade de área física para sua constituição devem ser levados em conta na análise comparativa das tecnologias.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio no desenvolvimento do programa de pós doutorado do primeiro autor, no ano de 2001, no LABSOLAR/UFSC, e ao CNPq. Os autores agradecem aos comentários dos revisores *ad hoc*.

## 8. Referências

- Abdallah, H., Harvey, S., 2001, "Thermodynamic analysis of chemically recuperated gas turbines", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 40, pp. 372-384.
- Awerbuch, S., Dillard, J., Mouck, T., Preston, A., 1996, "Capital budgeting, technological innovation and the competitive environment of the electric power industry", Energy Policy, Vol. 24, pp. 195-202.
- Berry, T., Jaccard, M., 2001, "The renewable portfolio standard: design considerations and an implementation survey", Energy Policy, Vol. 29, pp. 263-277.
- Biasi, V. (Edt.), 2000, "Gas turbine world 2000-2001 handook", Pequot Publ, Fairfield, CT.
- Carcasci, C., Facchini, B., Harvey, S., 1998, "Modular approach to analysis of chemically recuperated gas turbine cycles", Energy Conversion and Management, Vol. 39, n. 16-18, pp. 1693-1703.
- Dias, R.A., Mattos, C.R., Balestieri, J.A.P., 2001, "Educação, cidadania e tecnologia através de temas transversais", Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Monografia, Prêmio Jovem Cientista.
- Finnveden, G. *et al.*, 1995, "Solid waste treatment within the framework of life-cycle assessment", Journal Cleaner Production, Vol.3, n.4, pp. 189-199.
- Foray, D., Grübler, A., 1990, "Morphological analysis, diffusion and lock-out of technologies: ferrous casting in France and Germany", Research Policy, Vol. 19, pp. 535-550. APUD: Gritsevskiy, A., Nakicenovic, A., 2000, op. cit., pp. 914.
- Gallo, W.L.R., 1997, "A comparison between the HAT cycle and other gas-turbine based cycles: efficiency, specific power and water consumption", Energy Conversion and Management, Vol. 38, n. 15-17, pp. 1595-1604.

- Gritsevskiy, A., Nakicenovic, A., 2000, "Modeling uncertainty of induced technological change", *Energy Policy*, Vol. 28, pp. 907-921.
- Hasatani, M., 1997, "Highly efficient conversion technologies for energy utilization", *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, n. 10-13, pp. 931-940.
- Henderson, R., Clark, K.B., 1990, "Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and failure of established firms", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 35, pp. 9-30. APUD: Awerbuch, S., Dillard, J., Mouck, T., Preston, A., 1996, *op. cit.*
- Heppenstall, T., 1998, "Advanced gas turbine cycles for power generation: a critical review", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, p. 837-846.
- Hisazumi, Y., Yamasaki, Y., Sugiyama, S., 1998, "Proposal for a high efficiency LNG power-generation system utilizing waste heat from the combined cycle", *Applied Energy*, Vol. 60, p. 169-182.
- Holanda, M.R., Balestieri, J.A.P., 1999, "Cogeneration in a solid-wastes power station: a case study", *Applied Energy*, Vol. 63, n. 2, pp. 125-139.
- Horlock, J.H., 1998, "The evaporative gas turbine [EGT] cycle", *Journal of Eng. For Gas Turbines and Power*, Vol. 120, pp. 336-343.
- Kayukawa, N., 2000, "Comparisons of MHD topping combined power generation systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, pp. 1953-1974.
- Küçük, M.M., Demirbas, A., 1997, "Biomass conversion processes", *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, n.2, pp. 151-165.
- Larson, E.D., 1993, "Technology for electricity and fuels from biomass", *Annual Rev. of Energy and Environment*, Vol. 18, pp. 567-630.
- Lenssen, N., Flavin, C., 1996, "Sustainable energy for tomorrow's world – the case for an optimistic view of the future", *Energy Policy*, Vol. 24, n9, pp. 769-78.
- Lior, N., 1997, "Advanced energy conversion to power", *Energy Conversion and Management*, Vol.38, pp. 941-955.
- Lunghi, P., Ubertini, S., Desideri, U., 2001, "Highly efficient electricity generation through a hybrid molten carbonate fuel cell-closed loop gas turbine plant", *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 1657-1672.
- Joshi, M. M., Lee, S., 1996, "Integrated gasification combined cycle – a review of IGCC technology", *Energy Sources*, Vol. 18, pp. 537-568.
- Miranda, M.L., Hale, B., 1997, "Waste not, want not: the private and social costs of waste-to-energy production", *Energy Policy*, Vol. 25, n.6, pp. 587-600.
- Nakahamkin, M., Swensen, E.C., Wilson, J.M., Gaul, G., Polsky, M., 1996, "The cascaded humidified advanced turbine (CHAT)", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 118, pp. 565-571.
- Otoma, S., Mori, Y., Terazono, A., Aso, T., Samashima, R., 1997, "Estimation of energy recovery of CO<sub>2</sub> emissions in municipal solid waste power generation", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 20, pp. 95-117.
- Sondreal, E. A. *et al.*, 2001, "Review of advances in combustion technology and biomass cofiring", *Fuel Processing Technology*, Vol. 71, pp. 7-38.
- Stambler, I., 2000, "New push on fuel cell gas turbine hybrids for distributed generation", *Gas Turbine World*, Vol. 30, n.5, pp. 14-18.
- Tillman, D. A., 2000, "Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 19, pp. 365-384.

## 6. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## ADVANCED TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES WITH POSSIBLE COGENERATION USE

### José Antônio Perrella Balestieri

UNESP – Guaratinguetá Campus – Energy Department, PO Box 205 – 12516-410 – Guaratinguetá – SP  
[perrella@feg.unesp.br](mailto:perrella@feg.unesp.br)

### Sergio Colle

UFSC – Mechanical Engineering Department – PO Box. 476 – 88040-090 – Florianópolis – SC  
[colle@emc.ufsc.br](mailto:colle@emc.ufsc.br)

**Abstract.** *Cogeneration systems planning is usually based on conventional thermal cycles, that are commercially available; however, advanced generating technologies have been presented in the literature, some of them under construction as prototypes or pilot plants. Recent publications discuss the need of a "taxonomy" for classifying them, as well as for indicating their technical, economic and environmental characteristics to distinguish the technological niches, and so to guide the policies according to the ones that present higher probability of implementation success. This article presents a review about the taxonomy proposals presented in the literature, and identifies the main technological alternatives for a possible future use in cogeneration systems by appointing the ones that present the more attractive indices for the medium and long term utilization.*

**Keywords.** *Advanced technologies, cogeneration, fuels, taxonomy.*