

2

Fundamentos Teóricos

2.1

Geração distribuída e cogeração

A geração distribuída ou descentralizada de energia é proporcionada por uma fonte geradora com produção destinada, em sua maior parcela, a cargas locais/próximas, alimentadas sem a necessidade de transporte da energia através de redes de transmissão.

A geração distribuída apresenta vantagens em relação à geração descentralizada tais como:

- atendimento rápido ao crescimento da demanda, pelo menor tempo de implantação e a não necessidade de reforços nas redes de transmissão;
- aumento da confiabilidade do suprimento aos consumidores próximos à geração local;
- aumento da estabilidade do sistema elétrico e;
- redução das perdas de transmissão.

Resumindo, na implantação de GD se objetiva o menor carregamento de cabos, menores perdas de transmissão, menor custo de manutenção, menor quantidade de linhas ociosas, entre outros [7].

Quando a GD está conectada a um sistema elétrico de potência convencional, são necessários equipamentos (hardware e software) de interconexão, usualmente baseados em circuitos de potência. Além disto, o eventual excesso de energia gerada por uma fonte de GD pode ser fornecida a rede CA. A regulamentação brasileira que trata deste tipo de acesso aos sistemas de distribuição foi publicada pela ANEEL, no documento intitulado “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”.

Em termos mundiais, a norma IEEE 1547 é adotada por concessionárias. Ela estabelece que, quando uma fonte independente é conectada a um sistema elétrico de potência (SEP), devem ser considerados aspectos de caráter geral (regulação de

tensão, aterramento, sincronização, energização inadvertida, monitoração, equipamento de isolamento, interferência eletromagnética, surtos e equipamentos em paralelo), aspectos de operação defeituosa do SEP (defeitos, reenergização, resposta à perturbação de tensão, resposta à perturbação de frequência e perda de sincronismo), aspectos de qualidade de energia (Injeção de componentes CC, Cintilação de tensão e harmônicos) e situação de ilhamento [8].

Cogeração é a produção conjunta de trabalho mecânico e calor utilizável a partir da queima de um combustível, sólido ou líquido, e que se faz simultaneamente e de uma forma seqüenciada, para atender à demanda de usos finais da produção simultânea de energia elétrica e energia térmica. A queima pode ser feita a partir do uso de um combustível convencional derivado de petróleo (gás natural, óleo combustível, diesel), carvão ou algum tipo de biomassa ou resíduo industrial (lenha, madeira, bagaço de cana, casca de arroz, etc.). Esta alternativa, assim como a conservação, tem como principal característica a preocupação com o emprego mais eficiente dos recursos energéticos [9, 10, 11].

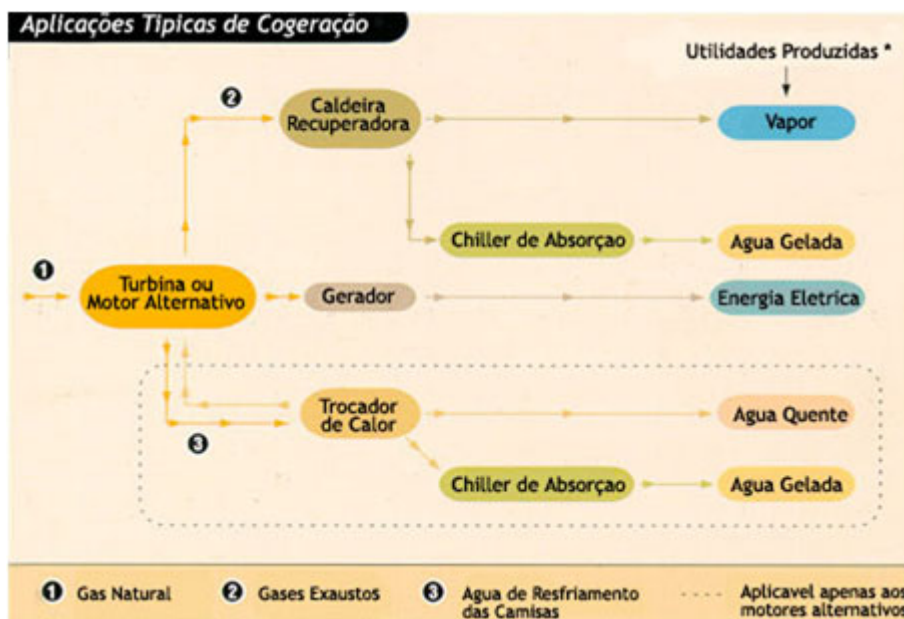


Figura 1 - Aplicações Típicas de Cogeração.

Os sistemas de cogeração são basicamente separados em dois grandes grupos:

- *Topping cycle* – onde o combustível é utilizado na produção de energia elétrica, em motores e turbinas e o calor da exaustão é recuperado e utilizado no processo;

- *Bottoming cycle* – onde o combustível produz primeiramente o calor utilizado no processo e a exaustão do processo serve como insumo para ser aproveitado, através de um trocador de calor, para gerar vapor de recuperação a ser utilizado na geração de eletricidade [10].

As usinas termelétricas convencionais transformam em trabalho mecânico a energia da fonte primária, apresentando eficiência térmica entre 30 e 40%. Sendo o restante perdido na forma de calor na exaustão.

Na cogeração, a energia da exaustão que seria inaproveitada é utilizada para prover calor a um processo podendo alcançar um aproveitamento em torno de até 90% de energia contida no combustível. Além de dar melhor uso à energia do combustível reduz-se o impacto ambiental, especialmente quanto às emissões gasosas. Desta forma, apresenta um rendimento superior ao obtido a produção de eletricidade e vapor em unidades separadas, representando maior confiabilidade e qualidade de energia para o usuário.

Essa energia de exaustão da turbina pode ser utilizada diretamente na alimentação de fornos, transformada em vapor de baixa, média e alta pressão, força motriz, sendo ainda possível a produção de CO, CO₂, e NO_x a partir da descarga dos gases de combustão, na secagem de grãos e produtos ou na utilização do vapor para a geração de frio a baixa temperatura, com emprego de unidades de absorção utilizando amônia e água. [9, 10].

Apesar dos ganhos alcançados no rendimento térmico das turbinas a gás operando em ciclo simples, existe significativa quantidade de energia não aproveitada nos gases de exaustão. Entre outras tecnologias empregadas na recuperação dessa energia destaca-se o ciclo combinado e a cogeração.

O ciclo combinado consiste no aproveitamento dos gases para a produção de vapor através de trocadores de calor (caldeiras de recuperação de calor) e utilização do vapor para mover turbinas a vapor e gerar energia adicional. Os ciclos combinados apresentam rendimentos térmicos próximos a 60% [12, 13].

A cogeração é aplicável em instalações que necessitem simultaneamente de energia térmica e elétrica. Entre os diversos segmentos que podem mais se beneficiar dessa tecnologia de efficientização da gestão energética, encontram-se os que apresentam ganhos de escala pelo aumento da eficiência da máquina térmica, bem como pela redução do custo específico de investimento e produção com o aumento da potência, tais como: [9]

- Indústria: alimentos, bebidas, química, petroquímica, papel e celulose, cerâmica, farmacêutica;
- Comércio: shopping centers, supermercados, complexos comerciais;
- Serviços: hospitais, hotéis, aeroportos, grandes condomínios.

E as vantagens são:

- Auto-suficiência energética;
- Qualidade da energia elétrica;
- Melhoria da eficiência energética do processo;
- Redução dos impactos ambientais;
- Foco na atividade principal da empresa.

O fornecimento de energia sem interrupções, ou seja, a existência de uma central de cogeração é, por si só, uma garantia de segurança no abastecimento de energia elétrica. Este é um aspecto difícil de quantificar em termos econômicos, mas extremamente valioso, principalmente em certos processos industriais.

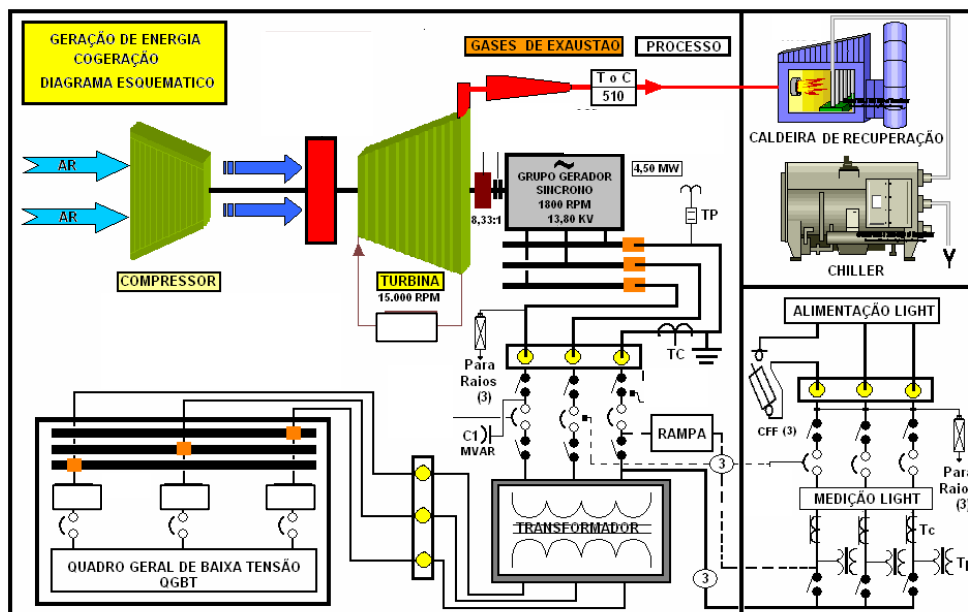


Figura 2 - Diagrama esquemático de um sistema de cogeração.

Contra-pondo as vantagens da cogeração expostas anteriormente, ressalta-se que as demandas das utilidades geradas nem sempre se apresentam na proporção que a cogeração pode fornecer, e devem existir próximas às suas produções, pois o transporte de vapor e/ou água quente por longas distâncias apresenta perdas significativas. Assim na análise de viabilidade técnica/econômica de instalações, deve-se considerar a necessidade de cada utilidade (energia elétrica, vapor, etc), a temperatura de processo requerida e a necessidade de queima adicional de combustível para a eficiência global do processo [10].

2.2

A Cogeração a gás natural

De modo similar aos demais combustíveis fósseis, o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, originados da decomposição de matéria orgânica fossilizada. Em seu estado natural é composto principalmente por metano, com proporções variadas de etano, propano, butano, hidrocarbonetos mais pesados, CO_2 , N_2 , H_2S , água, ácido clorídrico, metanol e outras impurezas.

As principais propriedades do gás natural são a sua densidade em relação ao ar, o poder calorífico, o índice de Wobbe, o ponto de orvalho da água e dos hidrocarbonetos e os teores de carbono, CO_2 , hidrogênio, oxigênio e compostos sulfurosos. Outras características intrínsecas importantes são os baixos índices de emissão de poluentes, em comparação a outros combustíveis fósseis, rápida dispersão em caso de vazamentos, os baixos índices de odor e contaminantes. Ainda comparativamente a outros combustíveis fósseis o gás natural apresenta vantagem em termos de transporte e aproveitamento.

Com o aproveitamento dos melhores potenciais hidráulicos do país, conjugado com a necessidade de expansão do setor, a cogeração a gás se apresenta como uma fonte alternativa técnico-econômica competitiva, além de gerar empregos locais e dar maior autonomia energética aos setores usuários [10, 13, 14].

O gás natural tem sido o combustível mais utilizado nos diversos sistemas de cogeração devido às suas características físico-químicas, bastante favoráveis quando comparadas com outros combustíveis fósseis. Como benefícios mais significativos na sua utilização têm [13, 15]:

- Prazo de maturação relativamente pequeno;
- Utilização direta do combustível, sem necessidade de processos intermédios de tratamento e refinação;
- Flexibilidade para atendimento de cargas de ponta;
- Abastecimento de combustível através de gasodutos, o que evita a construção de depósitos de armazenamento na instalação consumidora;
- Redução significativa nas emissões de poluentes atmosféricos. A combustão do gás natural permite uma redução importante nas emissões de CO₂ quando comparado com outros combustíveis fósseis, obtendo-se reduções até 20% em relação ao óleo combustível e até 50% em relação ao carvão. Por outro lado, são praticamente nulas as emissões de partículas e de óxidos de enxofre;
- Redução significativa nos custos de manutenção devido à menor deposição de resíduos de carbono nas partes internas do motor;
- Redução até 70% no consumo de óleo de lubrificação comparativamente aos sistemas de cogeração a óleo combustível;
- Preço bastante competitivo comparativamente com os combustíveis com origem nas frações pesadas da nafta.

Por outro lado, as turbinas a gás são máquinas extremamente sensíveis às condições climáticas principalmente em relação à temperatura ambiente, e apresentam também alterações substanciais de rendimento térmico no caso de operação em cargas parciais [13, 15].

Os setores onde preferencialmente são utilizadas centrais de cogeração a gás natural são: [15]

- Indústria têxtil;
- Indústria cerâmica;
- Indústria agro-alimentar;
- Indústria química;
- Indústria papel e celulose;
- Hospitais;
- Edifícios comerciais de serviços;
- Indústria agrícola;
- Redes de distribuição de calor e frio;
- Consumidores de energia elétrica e térmica, em geral.

2.3

Caldeiras de recuperação

São equipamentos utilizados para aproveitar o calor dos gases de exaustão de instalações industriais, como fornos, plantas químicas, refinarias, etc. ou do escape de turbinas a gás, produzindo vapor ou água quente por troca térmica. Têm basicamente os mesmos componentes das convencionais, exceto a fornalha.

Em geral são do tipo aquatubular. A circulação de água pelos tubos pode ser feita por convecção natural, ou forçada, com o emprego de bombas.

Em unidades de circulação natural, os tubos da caldeira são verticais e a movimentação do fluido se dá por diferença de densidades entre a fase líquida e o vapor. A inexistência de bombas de circulação reduz os custos de manutenção e os riscos de falhas associados.

As unidades com circulação forçada empregam bombas para a circulação de água e vapor através do feixe tubular. Têm dimensões físicas menores, *start-up* (partidas) mais rápidas e possibilitam a geração de vapor superaquecido (acima de 373°C).

Em aplicações com turbinas a gás (onde os gases de exaustão são limpos), as caldeiras de recuperação podem usar trocadores de calor com tubos aletados, permitindo uma construção mais compacta. Por outro lado, se os gases de exaustão forem “impuros”, apresentando cinzas, por exemplo, a superfície dos trocadores deve ser lisa, sem aletas, com previsões para limpeza e remoção de impurezas.

A energia térmica contida nos gases inflados nas caldeiras de recuperação não pode ser totalmente recuperada para a geração de vapor ou água quente. Parte dessa energia é perdida na exaustão da caldeira, visto que para se evitar a corrosão pela condensação do vapor d'água presente nos gases e formação de ácidos, as temperaturas na exaustão das caldeiras são projetadas para se situarem em torno dos 130 a 170°C [16].

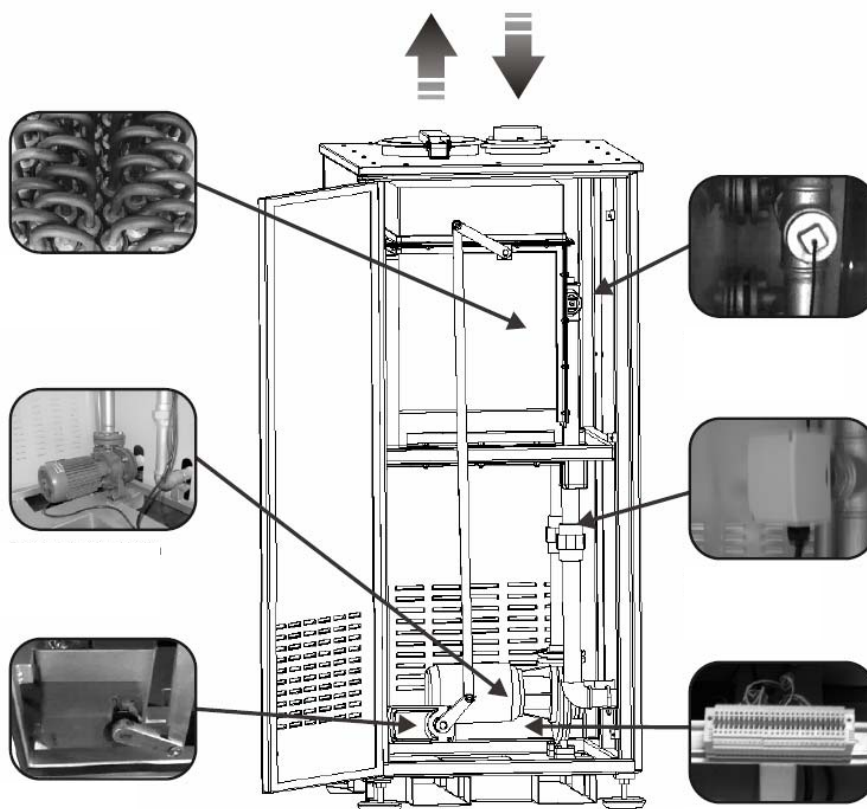


Figura 3 - Esquema da caldeira de recuperação.

2.4

Microturbinas a gás (MTG)

Microturbinas são geradores de energia elétrica que queimam combustíveis líquidos e gasosos, funcionam em altas rotações integradas a sistemas de eletrônica de potência, permitem sua operação isolada ou em paralelo a rede elétrica.

Microturbinas são sistemas de geração termelétrica compactos, destinados à produção de eletricidade e calor. O sistema é composto de um gerador elétrico ligado coaxialmente a um conjunto turbocompressor, o qual é acionado por queimador de combustível. A energia química do combustível é transformada em energia térmica no queimador (ou câmara de combustão). Uma parcela da energia térmica é transformada em energia mecânica no turbocompressor. O gerador elétrico acoplado ao turbocompressor transforma a energia mecânica em energia

elétrica [2, 3]. A energia térmica remanescente dos gases exaustos da queima pode ser aproveitada na forma de calor para aquecimento.

As microturbinas surgiram no mercado automobilístico entre 1950 e 1970. A primeira geração foi baseada em turbinas originalmente designadas para aplicação em: geradores de estações de lançamento de mísseis, geradores de avião, ônibus e outros meios de transporte comercial [34].

Atualmente a tecnologia é o resultado do trabalho de desenvolvimento em pequenas turbinas a gás estacionárias e automotivas, equipamentos auxiliares de potência (APU), e turbocompressores. As microturbinas começaram a serem testadas por volta do ano de 1997 e tornaram-se comercialmente disponíveis no ano de 2000 [18].

A faixa de potência das microturbinas disponíveis e em desenvolvimento é 15 kW a 500 kW. Atualmente, as maiores turbinas a gás convencionais chegam a 330 MW de potência e os rendimentos térmicos atingem 42%. Microturbinas operam em altas rotações e podem ser utilizadas somente para geração de eletricidade ou em sistemas de cogeração. Elas podem ser especificadas para operar com os seguintes combustíveis: gás natural, gases de baixo poder calorífico, GLP, propano, e combustíveis líquidos como gasolina, Diesel, querosene e provavelmente etanol e metanol [3, 4, 5, 13, 17, 18, 19, 20].

Os modelos de microturbinas disponíveis no mercado são todos importados, tornando os custos de aquisição elevados devido as taxas de importação e taxas de câmbio, embora já existam esforços e para o desenvolvimento de uma microturbina nacional [2].

2.4.1

Aplicações

Os sistemas com microturbinas foram desenvolvidos para instalações estacionárias. São compactos, tem baixo nível de emissão de gases e ruído inferior aos sistemas de geração com motores de combustão interna.

Microturbinas são idealmente apropriadas para aplicações de geração distribuída (GD) devido a flexibilidade dos métodos de conexão com a rede, habilidade de operação com várias unidades de modo a suprir - cargas elétricas

maiores, habilidade de fornecer potência estável e confiável, e níveis baixos de emissões.

O sistema possui controles que fazem o monitoramento contínuo da rede elétrica. Assim, o sistema pode operar como fonte única de energia ou como fonte secundária paralela à rede, pode entrar em operação automaticamente em horários predefinidos ou toda vez que o custo da energia gerada pela microturbina atinge um valor inferior ao da concessionária de distribuição de energia ou em caso de interrupção do fornecimento da concessionária. Toda a operação do sistema é automática, incluindo o “start-up”, sincronização com a rede, despacho e desligamento [3, 5, 17, 18, 19, 20].

Os tipos de aplicações incluem:

- Peak shaving e base load (paralelo com a rede da concessionária);
- Sistemas de cogeração;
- Stand-alone;
- Backup/standby;
- Geração de energia primária com a rede como *backup*.

Entre os clientes alvos pode-se destacar: bancos, *datacenters*, centros de telecomunicação, restaurantes, escolas, hotelaria, hospitais, varejistas, prisões, prédios comerciais e outros dos setores comercial e industrial. Em sistemas de cogeração, os gases de exaustão da microturbina são utilizados para produção de água quente, para aquecimento, para acionamento de *chillers* de absorção e equipamentos de desumidificação, como também, fornecer energia térmica necessária em processos industriais e comerciais.

2.4.2

Descrição tecnológica

2.4.2.1

Princípio de funcionamento

As microturbinas consistem, na maioria dos casos, de um compressor, combustor, turbina, recuperador e gerador. Todos os componentes, com exceção do recuperador estão montados em um mesmo eixo (não possui caixa de engrenagem/transmissão, com apenas uma parte móvel, trazendo vantagens de maior confiabilidade, operação mais silenciosa e menores vibrações) o que representa uma relativa simplicidade de fabricação e manutenção, conforme mostrado na Fig. 4.

Os compressores e turbinas são tipicamente radiais como na maioria dos turbocompressores automotivos, o que pode ser observado na Fig. 5. Tipicamente, as microturbinas operam com rotações de 30.000 a 120.000 rpm, dependendo da potência nominal e do fabricante, sem lubrificação, no caso de mancais a ar (o que evita a contaminação de lubrificantes com produtos da combustão, garante uma maior vida útil do equipamento e reduz os custos de manutenção), ou com lubrificação. Elas acionam um gerador de ímã permanente que produz uma voltagem variada, e uma corrente alternada de alta frequência, entre 1400 e 1800 Hz. Assim, faz-se necessário um retificador e um inversor de frequência, para transformar a corrente alternada de alta frequência em corrente contínua e, em seguida, em corrente alternada na usual baixa frequência da rede de 50 ou 60 Hz [1, 2, 3, 4, 5, 34].

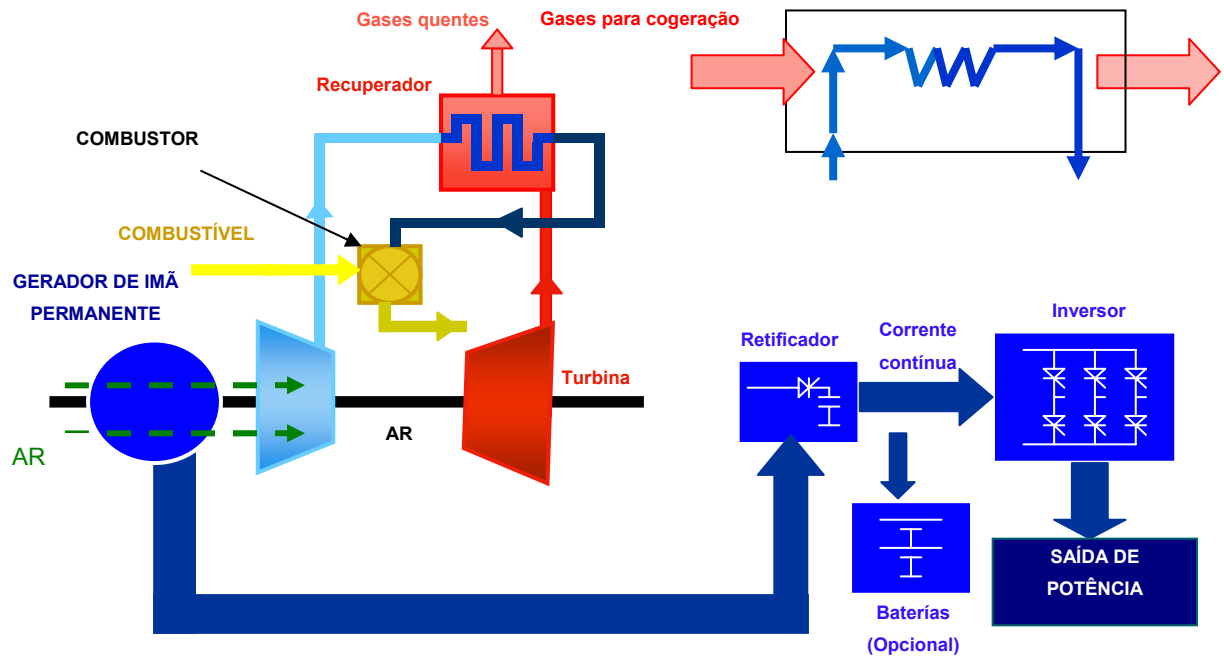


Figura 4 - Microturbina com recuperador de calor.

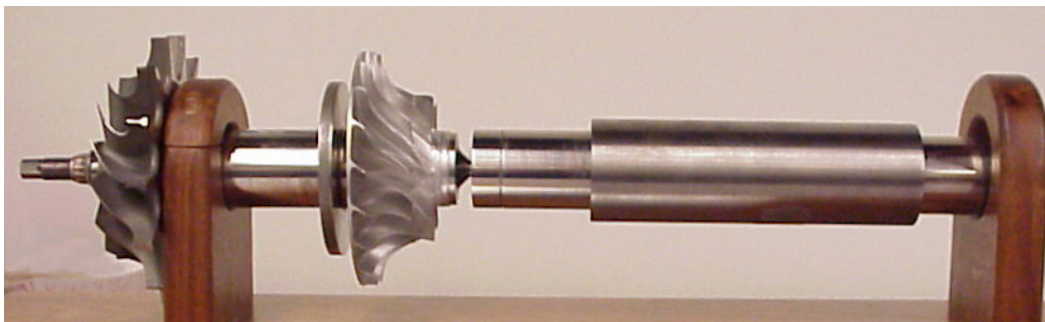


Figura 5 - Fotografia do conjunto compressor e turbina da microturbina Capstone.

As microturbinas apresentam características próprias, apesar de seu princípio de funcionamento ser o mesmo das turbinas a gás convencionais de maior porte. O ar ganha pressão ao passar pelo compressor, em seguida é forçado através de um recuperador de calor, nas microturbinas dotadas deste dispositivo, onde é pré-aquecido pelos gases de descarga antes de entrar na câmara de combustão, reduzindo, através desse processo, o consumo de combustível do sistema. Na câmara de combustão, se dá a queima da mistura do ar pressurizado e pré-aquecido misturado ao combustível. Os gases quentes da queima se expandem através da turbina, que move o compressor e o gerador de energia elétrica (montado no mesmo eixo) ou qualquer outra carga mecânica. Os gases de escape saem da turbina e trocam calor com o ar de entrada no recuperador de

calor, antes de serem expelidos para fora do sistema. A energia térmica contida nestes gases de escape pode ser aproveitada, utilizando-se, por exemplo, uma caldeira de recuperação, conforme pode ser visto na Fig. 1 [4, 5, 17, 18, 19, 20].

A temperatura dos gases de combustão esta geralmente limitada a 980 °C ou abaixo, de modo a permitir a utilização de materiais relativamente mais baratos das partes quentes da microturbina [18].

Múltiplas unidades, também, podem ser combinadas para fornecimento de maior quantidade de energia, conforme Fig. 6 [4, 5, 18, 19, 20].



Figura 6 - Microturbinas Capstone – Modelo 330 (30 kW) - 10 unidades.

2.4.2.2

Componentes básicos

Pacote Turbo-Compressor

Os componentes básicos de uma microturbina são o compressor, turbina, gerador, e recuperador. O coração da microturbina é o pacote compressor-turbina, o qual é comumente montado em um único eixo juntamente com o gerador elétrico. Dois mancais suportam o eixo. A única parte móvel do projeto de um eixo possui o potencial da redução de manutenção necessária e o aumento da confiabilidade, quando comparado com o de dois eixos. Existe também a versão

de dois eixos, na qual a turbina do primeiro eixo aciona o compressor, enquanto a turbina de potência do segundo eixo aciona um redutor (gearbox) que por sua vez aciona um gerador elétrico convencional, produzindo potência elétrica em 60 ou 50 Hz. As características do projeto da versão dois eixos, apesar de apresentar mais partes móveis quando comparadas com a de um eixo, não requerem a eletrônica de potência para converter potência em alta frequência (AC) em frequência de 60 ou 50 Hz [4, 5, 18, 19, 20].

Gerador

As microturbinas produzem potência elétrica de duas maneiras: via um gerador de alta rotação acoplado em único eixo com turbo-compressor ou com uma turbina de potência (projeto de dois eixos) acionando um redutor de velocidade e um gerador convencional a 3600 rpm, 60 Hz. O gerador de alta rotação (microturbinas de um eixo) emprega um alternador de ímã permanente, e necessita que a alta frequência de saída do gerador (AC) em torno de 1600 Hz seja convertida para 60 ou 50 Hz para uso geral. Esta transformação envolve a retificação da alta frequência AC para DC, e então a inversão de DC para 60 ou 50 Hz AC. A conversão de potência possui uma eficiência de aproximadamente 5%. Para o start-up de uma microturbina de eixo simples, o gerador atua como motor, girando o eixo do turbo-compressor até uma determinada rotação de modo a iniciar o processo de combustão. Portanto, o start-up completo até a potência desejada necessita de alguns minutos. Se o sistema opera independente da rede da concessionária, baterias são utilizadas para acionar o gerador no processo de start-up [18].

Recuperador

O recuperador de calor é um trocador de calor que utiliza os gases quentes de exaustão (tipicamente em torno de 650 oC) para pré-aquecer o ar comprimido (tipicamente em torno de 150 oC) que vai para câmara de combustão, reduzindo desta maneira, o combustível necessário para aquecer o ar comprimido até a temperatura de entrada da turbina. Dependendo dos parâmetros de operação das microturbinas, o recuperador pode mais que dobrar a eficiência da máquina térmica [18].

Mancais

Microturbinas operam tanto com mancais lubrificados a óleo ou a ar, que suportam o(s) eixo(s). Os mancais lubrificados a óleo são mancais mecânicos e podem vir nas três principais formas: De rolamento metálico para altas rotações, hidrodinâmico e de superfície cerâmica. A última, tipicamente oferece o benefício mais atrativo em termos de duração, temperatura de operação, e fluxo de lubrificante. Enquanto é uma tecnologia bem estabelecida, eles requerem uma bomba de óleo, um sistema de filtragem de óleo, e um sistema de arrefecimento que adicionam para as microturbinas custos e manutenção [18].

Os mancais a ar têm sido utilizados em sistemas de resfriamento de cabines de aeronaves por muitos anos. Eles permitem a turbina girar em uma camada fina de ar, de modo a permitir um menor atrito e altas rotações. Nem óleo ou bomba de óleo é necessário. Os mancais a ar oferecem simplicidade de operação sem o custo, preocupação com a confiabilidade e requerimentos de manutenção. Existe preocupação em relação à confiabilidade dos mancais a ar, com relação aos numerosos e repetidos starts, devido ao atrito de metal com metal durante o start-up, shutdown, e variação de carga. A confiabilidade depende exclusivamente da metodologia do controle de qualidade dos fabricantes, e será somente comprovada, após várias experiências com um maior número de unidades e muitas horas de operação e ciclos de entrada e saída [18].

Eletrônica de Potência

Como discutido anteriormente, as microturbinas de um eixo apresentam controladores de potência digitais para converter potência em alta frequência (AC) produzida pelo gerador em eletricidade para o consumidor final. A alta frequência (AC) é retificada para (DC), e invertida novamente para 60 ou 50 Hz (AC), e então filtrada para reduzir a distorção harmônica. Este é um componente crítico no projeto de microturbinas de um eixo e representa grandes desafios, especialmente no casamento de carga da turbina com a carga requerida. Para levar em conta transientes e picos de voltagem, a eletrônica de potência é geralmente capaz de trabalhar com sete vezes a voltagem nominal [5, 18].

Os componentes eletrônicos também controlam todas as funções de operação e start-up. As microturbinas são geralmente equipadas com controles que permitem que a unidade seja operada em paralelo ou independente da rede da

concessionária, e internamente incorporam muitas das características requeridas para proteção do sistema e da rede quando operando em paralelismo. Os controles também permitem a operação e monitoramento remoto [18, 21].

2.4.2.3

Operação com sistemas de cogeração

Em operação com sistemas de cogeração, um segundo trocador de calor dos gases de exaustão do recuperador, transfere a energia destes para um sistema de água quente. O calor de exaustão pode ser utilizado para um grande número de aplicações, incluindo aquecimento de água potável, acionamento de chillers de absorção e sistemas de desumidificação, aquecimento de ambientes, aquecimento de processo e outros. Algumas microturbinas quando operando com sistemas de cogeração não utilizam recuperadores. Desta maneira, mais energia esta disponível nos gases de exaustão a ser recuperada [18].

Portanto, os modelos de microturbinas são diferenciados uns dos outros pelas seguintes características, conforme [4, 18, 20]:

Número de eixos - um ou dois. Os modelos com dois eixos têm caixa de redução e são recomendados para acionamento de cargas que exigem rotação variável, como bombas e compressores. Os sistemas de um único eixo são mais comuns e visam a geração de energia elétrica.

Tipo de mancal - com ou sem lubrificação (mancal a ar). Os modelos que fazem o uso do mancal a ar exigem menos manutenção, embora sua confiabilidade deva ser testada;

Com ou sem recuperador de calor. Os modelos com recuperador de calor apresentam maior eficiência térmica. Neste caso, a temperatura dos gases de descarga é menor e o potencial de cogeração é baixo.

2.4.2.4

Aspectos técnicos - econômicos e ambientais

Tipicamente, as microturbinas, dotadas de recuperador, podem produzir potência com eficiência elétrica entre 25-32%, baseado no poder calorífico inferior do combustível (PCI), e baixa emissão de NOx (menor que 9 ppm) utilizando gás natural, avaliado à 15% O₂ [18, 20, 21]. Sem o recuperador de calor, sua eficiência elétrica é reduzida para a faixa de 14 a 22% e sua emissão de NOx será aumentada, permanecendo, no entanto, abaixo de 35 ppm [19, 20, 21]. Em aplicações de cogeração, o sistema pode atingir eficiência total de até 80% [4, 20]. Vale mencionar, conforme [18], que uma carga parasitária de aproximadamente 5% da capacidade da microturbina é frequentemente requerida para o acionamento do compressor de gás natural, utilizado para alimentar a microturbina, quando necessário.

Quando utilizando gás natural, as microturbinas podem ser alimentadas na pressão de 0,2 psig a 80 psig, dependendo do modelo, requerendo, às vezes, um compressor para injetar o combustível na pressão da câmara de combustão [5, 19, 21, 22].

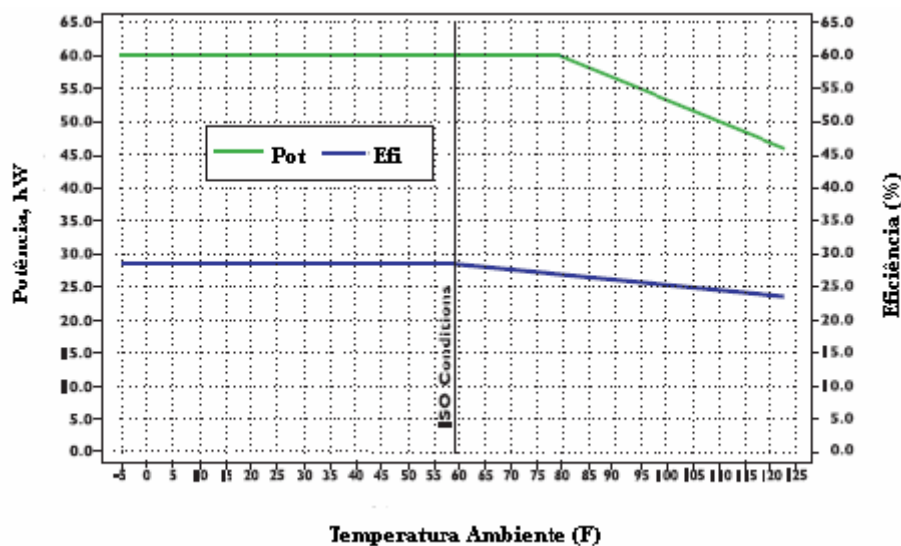
A Tabela 1 abaixo mostra as principais características de desempenho das microturbinas atuais.

Vale ressaltar, através da consulta dos catálogos dos fabricantes de microturbinas, Capstone e Turbec [21, 22], que o desempenho das microturbinas é representado nas condições ISO, ou seja, temperatura e pressão ambiente de 15 °C e 1 atm. Em lugares de temperaturas elevadas, como o Brasil, este fator pode ser preponderante no desempenho destas, pois, com o aumento da temperatura suas capacidades e eficiências são reduzidas [18, 21]. A Fig. 7 mostra o comportamento da eficiência e potência em função da temperatura ambiente (nível do mar) para uma microturbina 60 kW, modelo C60, do fabricante Capstone. Esta figura foi obtida do site da Capstone.

Tabela 1 - Características de desempenho das microturbinas.

Características de desempenho	Atuais
Eficiência elétrica (%), PCI	- Sem recuperador: 17 -20 - Com recuperador: 25-30
Vida útil	Entre 5 e 10 anos dependendo do tipo de aplicação.
Emissões (gás natural)	
CO ₂	670 - 1180 g/kWh (eficiência 17 – 30%)
SO ₂	Desprezível (gás natural)
NO _x	9-25 ppmv (15% O ₂)
CO	25-50 ppmv (15% O ₂)
Manutenção	Entre 10.000 e 12.000 horas antes do “overhaul” (troca do rotor)

Fonte: Arthur Little (2000)

**Figura 7** - Desempenho de uma microturbina de 60 kW em função da temperatura ambiente.

Outro fator importante é a operação das microturbinas em cargas parciais (part-load operation). A rotação do compressor, e conseqüentemente a vazão mássica de ar são reduzidas quando é reduzida sua potência e a temperatura de combustão. O grande impacto é a redução da eficiência termodinâmica (para uma dada condição ambiente) e o aumento das emissões. Na Fig. 8 são representadas

as eficiências (relativo ao ponto de projeto) de um microturbina de 30 kW, de um eixo, com um gerador de alta rotação em função da carga [18]. Na Fig. 9 são apresentadas as emissões de NO_x e CO de uma microturbina de 30 kW em função da carga [23].

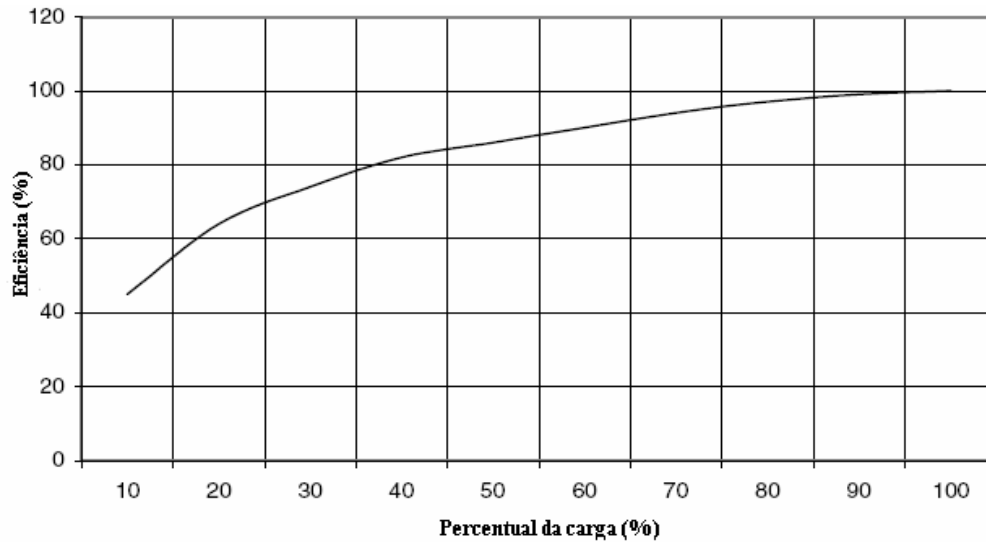


Figura 8 - Desempenho em carga parcial de uma microturbina de 30 Kw.

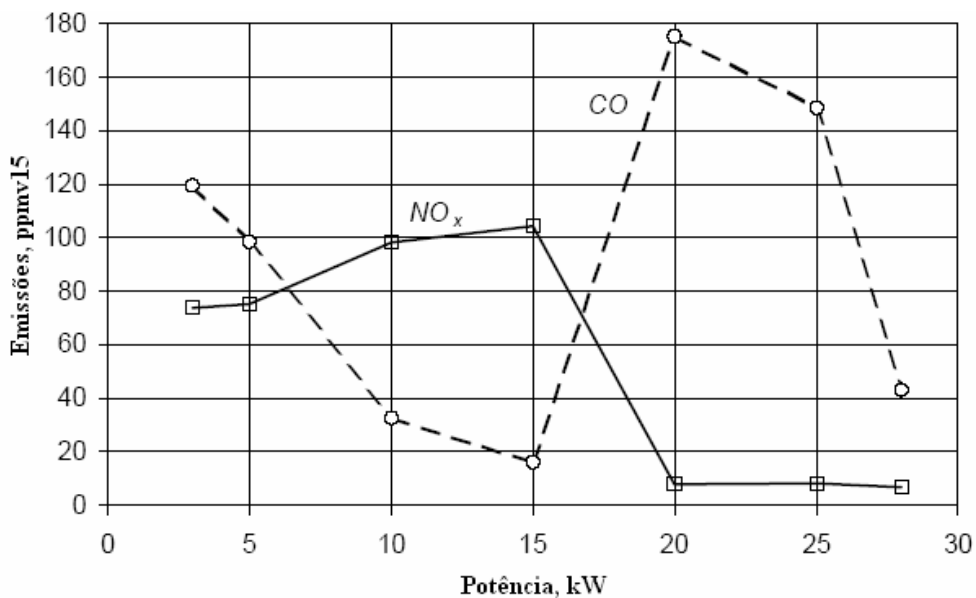


Figura 9 - Emissões de uma microturbina de 30 kW como função da carga.

Como se pode notar através das Figuras 8 e 9 a operação em cargas parciais de microturbinas, é um fator crítico com relação ao consumo de combustível e

emissões geradas, e que deverá ser levado em conta em projetos de geração distribuída.

O rendimento térmico, o custo de instalação e o custo de operação e manutenção são funções do estágio de desenvolvimento de cada modelo e da baixa escala atual de comercialização. A maioria dos modelos ainda encontra-se em fase de desenvolvimento. Aguarda-se, para os próximos anos, que o desenvolvimento tecnológico venha a garantir melhores rendimentos e menores custos de instalação e de O&M (operação e manutenção).

A tabela 2 fornece a estimativa do custo de capital para aplicações de geração eletricidade com microturbinas operando em paralelo com a rede da concessionária, conforme estudo realizado pelo Energy Nexus Group, 2002 [18]. Os custos de instalação (aquisição e montagem) referem-se a equipamentos instalados nos EUA.

Nota: Os dados da tabela são baseados em: Capstone Model 330 - 30 kW (MTG 1); IR Energy Systems 70 LM - 70 kW (dois eixos) (MTG 2); Turbec T100 - 100 kW (MTG 3); DTE modelo atualmente em desenvolvimento - 350 kW (MTG 4). Todos os modelos são de um eixo com exceção da microturbina de 70 kW.

Tabela 2 - Estimativa do custo de capital de microturbinas operando em paralelo com a rede da concessionária.

Custos dos Componentes	MTG 1	MTG 2	MTG 3	MTG 4
Capacidade Elétrica Nominal (kW)	30	70	100	350
Custos (US\$/kW)				
Equipamentos				
Microturbina	1000	980	750	700
Compressor de gás	Incluído	Incluído	Incluído	Incluído
Controle	179	143	120	57
Total dos equipamentos	1179	1123	870	757
Mão de obra/material	300	200	140	112
Capital total do processo	1479	1323	1010	869
Gerenciamento do projeto e construção	266	245	188	206
Engenharia e Taxas	130	85	64	44
Contingência do processo	56	50	38	34
Juros durante a construção	31	27	21	18
Custo Total da Planta (US\$/kW)	1962	1729	1320	1171

Fonte: Energy Nexus Group (2002)

A tabela 3 fornece a estima do custo de capital para sistemas de cogeração com as microturbinas apresentadas na Tabela 2, assumindo que o sistema de cogeração produza água quente e a microturbina operando em paralelo com a rede da concessionária. Estes dados são baseados no estudo realizado pelo Energy Nexus Group, 2002 [18].

Tabela 3 - Estimativa do custo de capital de sistemas de cogeração com microturbinas operando em paralelo com a rede da concessionária.

Custos dos Componentes	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Capacidade Elétrica Nominal (kW)	30	70	100	350
Custos (US\$/kW)				
Equipamentos				
✓ Microturbina	1000	1030	800	750
✓ Compressor de gás	Incluído	Incluído	Incluído	Incluído
✓ Trocador de calor	225	Incluído	Incluído	Incluído
✓ Controle	179	143	120	57
Total dos equipamentos	1403	1173	920	807
Mão de obra/material	429	286	200	160
Capital total do processo	1832	1459	1120	967
Custos dos Componentes	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Gerenciamento do projeto e construção	418	336	260	226
Engenharia e Taxas	154	146	112	86
Contingência do processo	72	58	45	38
Juros durante a construção	40	32	25	21
Custo Total da Planta (US\$/kW)	2516	2031	1561	1339

Fonte: Energy Nexus Group (2002)

Desde que o trocador de calor não é requerido para microturbinas que geram somente eletricidade, os custos de capital são mais baixos. Para as unidades que integram este equipamento em seus pacotes básicos, a economia será modesta, com uma redução em torno de US\$50/kW no preço do pacote básico. Adicionalmente, mão de obra de instalação e custos de materiais são reduzidos devido a não necessidade de acoplar o trocador de calor (já instalado no pacote) quando comparado com microturbinas que necessitam desta unidade em separado (Sistema 1).

Com relação aos custos de manutenção, as microturbinas ainda estão no início da curva de aprendizado, pois unidades comerciais iniciais têm sido

verificadas em serviço durante dois ou três anos, não mais. Com poucas horas de funcionamento (relativamente) deste grupo, as unidades no campo não geraram dados suficientes para permitir uma melhor definição na área de manutenção [18].

Muitos dos fabricantes oferecem contratos de serviço para manutenção especializada com custo em torno de US\$0,01/kWh. Este inclui inspeções periódicas do combustor (associado com as partes quentes) e mancal de óleo além das trocas regulares dos filtros de ar e óleo [18].

Um overhaul de uma microturbina a gás é necessário a cada 20.000 até 40.000 horas dependendo do fabricante, projeto e regime de operação. Um overhaul típico consiste na troca do eixo principal com o compressor e turbina acoplada, e inspeção e se necessário a troca do combustor. No dia do overhaul, outros componentes são examinados para determinar a ocorrência de desgastes, com a troca se necessários. Microturbinas são usualmente operadas com pelos uma partida e desligamento a cada dia. Existe um consenso sobre o efeito deste tipo de operação na durabilidade dos componentes [18].

Não existe diferença na manutenção para operação com combustíveis além do gás natural. No entanto, as experiências com combustíveis líquidos em turbinas a gás industrial sugerem que combustores que queimam tais combustíveis requerem inspeção e manutenção mais freqüentes do que os combustores de gás natural [18].

2.4.2.5

Barreiras tecnológicas e de penetração no mercado

O desenvolvimento necessário para as microturbinas se concentra no aumento da eficiência, redução dos custos, e flexibilidade do uso de combustíveis. Adicionalmente, a tecnologia precisa ser testada e demonstrada para aplicações comerciais. Elas enfrentam barreiras inerentes ao seu estágio de desenvolvimento e também aquelas que as outras tecnologias de geração distribuída vêm sofrendo, considerando-se que o setor elétrico foi estruturado com base nos sistemas de geração de grande porte e centralizado. As principais barreiras à penetração das microturbinas são [4, 5]:

Custo de capital elevado. Apesar dos fabricantes apontarem valores da ordem de US\$ 350 a 600 por kW, na prática, os preços são bem superiores. A

confiabilidade das microturbinas ainda está em fase de teste, ou seja, o estágio atual de desenvolvimento não permite creditar 100% de confiabilidade aos modelos que vem sendo comercializados;

A conexão com a rede também ainda carece ser testada e aprovada, para que a geração distribuída possa ser um reforço efetivo à energia da rede;

Taxas de conexão, tarifas de pedágio dos sistemas de transmissão e distribuição e energia de “backup” são as barreiras impostas pelas concessionárias num mercado onde as regras ainda não estão bem definidas;

Competição com tecnologias mais maduras como os motores alternativos à combustão interna;

A baixa qualidade do vapor gerado ou apenas água quente dificultam seu uso em sistemas de cogeração. Seu porte é limitado apesar da possibilidade da modularização. Geralmente, os sistemas de cogeração apresentam portes maiores.

O aumento da eficiência depende do desenvolvimento da eficácia do recuperador. O recuperador usa parte do calor dos gases de exaustão da microturbina para aquecer o ar que entra no combustor. Com recuperação, a eficiência elétrica tem sido aumentada para 26-32% contra 15-22%. Para se aproximar da meta de 40%, altas temperaturas serão requeridas, necessitando de altas temperaturas no recuperador, câmara de combustão, e turbina. Para resistir as altas temperaturas, serão requeridos avanços na resistência de materiais (isto é, cerâmica) para o recuperador, combustor e turbina [4, 5, 20].

Para alcançar a meta de custo de US\$400/kW (sem cogeração), fabricantes necessitarão se concentrar na redução de custos da unidade principal (microturbina) bem como, no pacote e suporte do equipamento. Microturbinas, tipicamente, empregam um eixo simples o qual conduz a simplicidade e fácil produção em massa, que será o fator chave para redução de custos. No entanto, microturbinas de eixo simples, que operam em altas rotações, requerem o uso de um retificador/inversor para fornecer corrente alternada em 60 ou 50 Hz e qualquer redução dos custos destes equipamentos conduziriam a um menor custo. Compressores de gás natural do tamanho necessário para as microturbinas são muito dispendiosos e conduzem altos custos de investimento como, também, gastos com O&M. Pesquisas em reproduzir as características de compressores maiores para unidades menores será a chave para o sucesso das microturbinas [4, 5, 20].

Potencialmente, microturbinas oferecem grande flexibilidade na utilização de diversos tipos de combustível, tal como biomassa e carvão, através da utilização de gaseificadores. Estes combustíveis são importantes em regiões que não possuem fornecimento de gás natural e oferta de tais combustíveis. Atualmente gaseificadores são caros e fornecem, com frequência, gás com impurezas ou contaminantes, que podem requerer dispendiosos limpadores, comprometendo o custo da instalação [5].

Resumindo, a tecnologia é nova e não testada. Eficiências de catálogo, níveis de emissões e a qualidade da energia gerada deverão ser verificados independentemente e não está claro se as projeções atuais de O&M são confiáveis. Testes independentes são necessários para diminuir as incertezas.

2.5

Reservatório Térmico (Boiler)

O reservatório térmico é composto por um cilindro fabricado com material resistente à corrosão cuja capacidade é variável de acordo com a necessidade do sistema, feito normalmente de aço inoxidável AISI 304 e que fica em contacto efetivo com a água, como mostrado na Fig. 10.

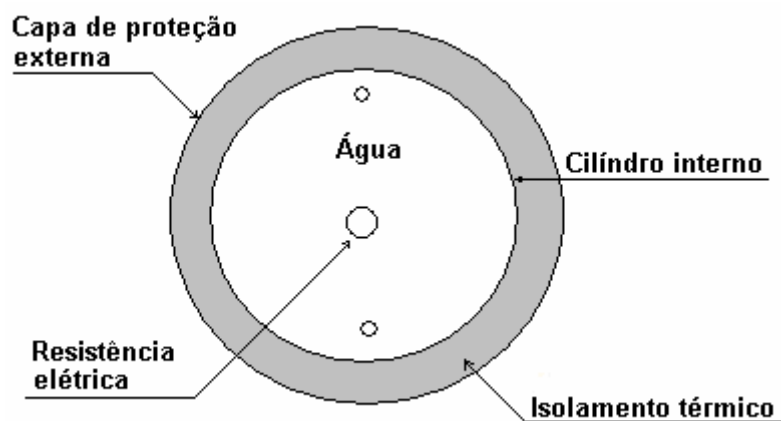


Figura 10 - Esquema do Tanque do Reservatório Térmico.

O cilindro interno é revestido por um material isolante térmico, normalmente de Poliuretano Expandido com 50 mm de espessura, que impede que a energia térmica escape para o ambiente em forma de calor, e por alumínio.

O Boiler traz um sistema de aquecimento, composto por duas resistências elétricas e duplo termostato; que funcionará sempre que a temperatura da água esfrie, ou seja, atinja o valor de ajuste dos termostatos. O valor de temperatura ajustado nos termostatos depende da necessidade da temperatura da água armazenada no boiler para suprir o sistema.