

1 Introdução

Perante aos diversos avanços e aprimoramentos tecnológicos e das perspectivas em relação ao setor energético, os sistemas de cogeração vêm ganhando uma atenção especial nos diferentes setores econômicos.

Respondendo de forma significativa às estratégias econômicas e operacionais, os novos sistemas de cogeração têm se tornado também um aliado importante para a redução e prevenção do aquecimento global, hoje seriamente discutido e analisado.

Além do propósito de atender a crescente demanda de energia e diminuir as emissões e poluição associada com o uso da energia, o uso da cogeração é fortemente recomendado quando existem novas zonas industriais a serem desenvolvidas e incidência do alto custo da energia elétrica [1].

De acordo com d'Accadia [2], a cogeração é mundialmente considerada como a principal opção para obter uma considerável economia de energia. Nos países asiáticos, ultimamente, tem-se notado grandes investimentos na área da cogeração em diferentes ramos da indústria e comércio. Em países europeus tem-se observado também um potencial crescimento no uso de sistemas de microcogeração no setor residencial.

Segundo Onowwiona [3], há uma grande disponibilidade de sistemas de cogeração e de equipamentos adequados para aplicações residenciais e comerciais de pequeno porte. Recentemente pode-se destacar dentre as tecnologias desenvolvidas para o uso em cogeração os seguintes sistemas: i) motor de combustão interna; ii) microturbinas; iii) célula de combustível e iv) motor Stirling.

Das diferentes aplicações que estes sistemas podem estar associados com a cogeração, conhecida também como "Combined Heat and Power - CHP", pode-se citar algumas finalidades como: geração para "stand-by", i.e., energia elétrica para sistema de emergência, geração de energia complementar durante períodos de alta demanda (hora de pico) e geração básica.

Novos estudos também vêm sendo realizados em relação ao uso do gás natural no setor energético do Brasil, de forma a contribuir para a geração distribuída e evitar a sobrecarga nas plantas e redes de transmissão de energia elétrica [4].

A geração distribuída se refere a um equipamento que gera potência elétrica, normalmente variando de 5 a 1000 kW, fornecendo energia elétrica para um local mais próximo dos clientes do que uma estação central de geração [5].

Como mencionado anteriormente, com o surgimento de novas tecnologias abre-se um novo nicho a ser explorado por diferentes segmentos. Um exemplo disto pode ser visto no crescente emprego de microturbinas a gás natural como fonte de geração de energia distribuída, o que vem sendo alvo de estudo, principalmente das concessionárias de energia elétrica [5, 6]. Uma outra grande vantagem no uso da microturbina é a sua baixa emissão de poluentes.

Espera-se também que o Brasil, em médio prazo, venha a se beneficiar com o uso de sistemas de cogeração de pequeno porte voltados para uso doméstico e para pequenos empreendimentos.

Portanto, diante destes acontecimentos, o presente trabalho se propõe a realizar uma análise do desempenho do sistema de cogeração, onde a unidade de teste está instalada no Ginásio de esportes da PUC-Rio. O sistema de cogeração consta de uma microturbina a gás natural de 30 kW para a geração de energia elétrica, uma unidade recuperadora de calor e um reservatório térmico que fornecerá água quente para consumo nos chuveiros do Ginásio.

1.1 Cogeração

É a produção simultânea e de forma seqüenciada, de duas formas de energia a partir de um único combustível conforme mostrado no diagrama da Fig. 1. O processo mais comum é a produção de energia elétrica e energia térmica (calor ou frio) a partir do uso de combustíveis como gás natural, biomassa, óleo diesel, entre outros.



Figura 1 – Diagrama de um sistema de cogeração

Considera-se como parte principal de uma instalação de cogeração as máquinas que produzem a energia elétrica e a energia térmica. Pode-se citar dentre muitos, os principais equipamentos que compõem esses sistemas:

- Turbina a Gás (ciclo Brayton);
- Turbina a Vapor (ciclo Rankine);
- Motores a combustão (ciclo Otto ou Diesel);
- Caldeiras que produzem vapor para as turbinas a vapor;
- Caldeiras de recuperação e trocadores de calor;
- Microturbinas;
- Geradores elétricos, transformadores e equipamentos elétricos associados;
- Sistemas de chillers de absorção, que utilizam calor (vapor ou água quente) para produção de frio (ar condicionado);
- Sistemas de ciclo combinado (turbinas a vapor e gás natural) numa mesma central;
- Equipamentos e sistemas de controle de geração de energia.

As plantas de cogeração podem ser classificadas de acordo com sua *seqüência térmica* da produção da potência elétrica e da energia térmica, da qual relaciona o tipo dos processos industriais, portanto as plantas de cogeração se classificam da seguinte maneira:

- a) Ciclo “topping”: a energia do combustível (primária) é usada primeiro para produzir potência, sendo o calor dos gases de exaustão utilizado na geração de energia térmica útil, Fig. 2. Estes ciclos são os mais encontrados nas plantas de cogeração [7, 8], naturalmente se tornando um ciclo mais efetivo e economicamente atrativo para a cogeração [9].

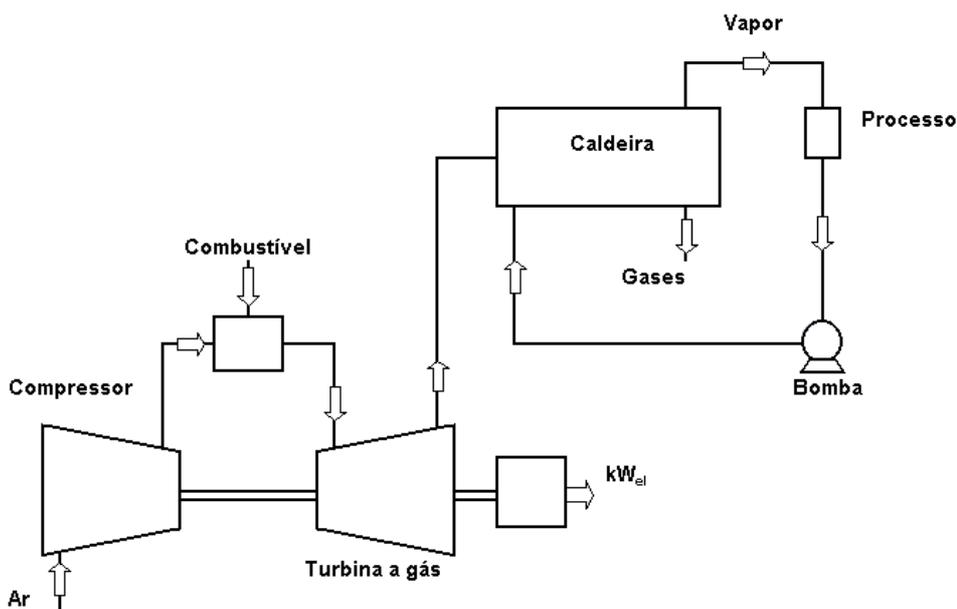


Figura 2 – Ciclo topping

- b) Ciclo “bottoming”: são sistemas cuja energia térmica primária do combustível é inicialmente cedida ao processo consumidor de calor e o rejeito empregado na geração de potência [8], Fig. 3. Estes ciclos geralmente são mais utilizados onde existe uma grande necessidade de calor a alta temperatura para o processo [9].

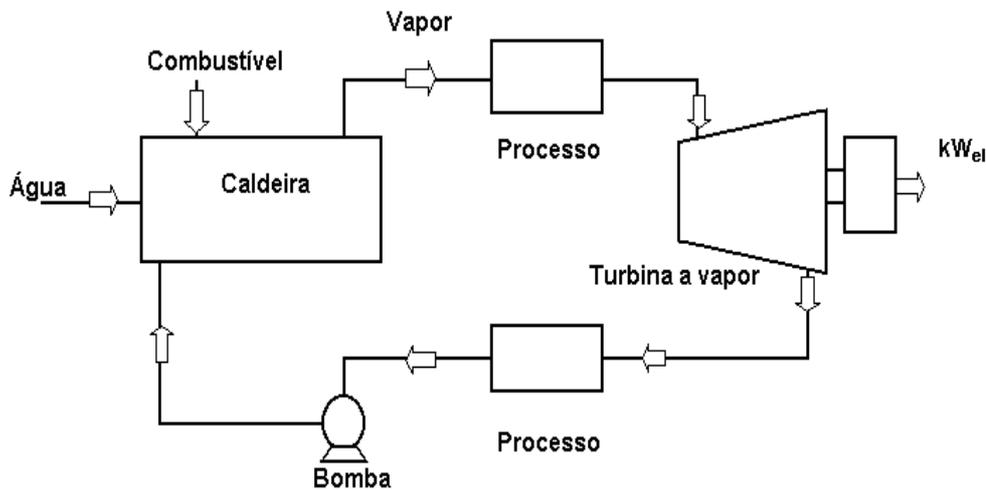


Figura 3 – Ciclo bottoming

Segundo Val [7], os sistemas de cogeração em relação ao dimensionamento da produção da potência e da energia térmica ainda podem se classificar em:

- Sistemas “Power-Matched”: nesta modalidade, a produção combinada do sistema visa a atender a demanda elétrica da planta, e a produção térmica resultante é o subproduto;
- Sistemas “Heat-Matched”: nesta modalidade, a produção combinada é dimensionada para satisfazer a demanda térmica, e produção elétrica é o subproduto.

Dentre os sistemas de cogeração mais difundidos está o de *Ciclo Combinado*, diagrama na Fig. 4, que favorecido também pela evolução tecnológica dos sistemas energéticos foi baseado na agregação de dois sistemas isolados num só sistema, permitindo assim aumentar a eficiência global da cogeração. Este tipo de cogeração é predominantemente utilizado em situações em que se deseja produzir energia elétrica e térmica úteis em quantidades variáveis, de acordo com as cargas consumidoras, ou para atender condições específicas.

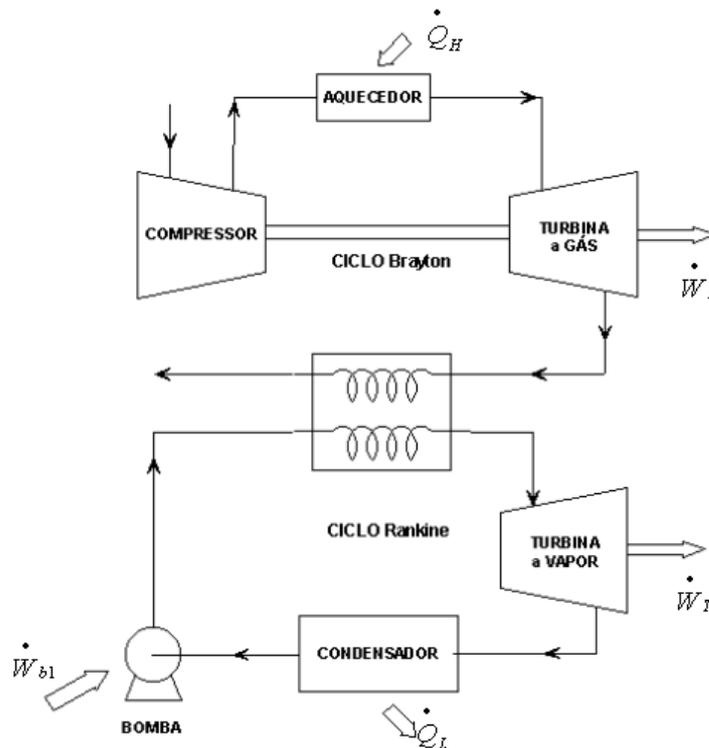


Figura 4 - Diagrama Ciclo Combinado - Turbina a gás e a vapor

Segundo Marlon [8], a escolha adequada de um sistema de cogeração requer uma avaliação de um grande número de fatores, podendo-se citar o seguinte:

- Demanda elétrica máxima e mínima;
- Demanda térmica máxima e mínima;
- Máximo retorno econômico;
- Relação custo marginal/benefício;
- Tarifa de energia elétrica, etc.

1.2

Estado da arte das tecnologias atuais em sistema de cogeração

Novas tecnologias têm despontado na área de cogeração, em especial em sistemas de microcogeração, sistema que tem como principal alvo a cogeração em residências e pequenas casas comerciais.

1.2.1

Sistemas baseados em motores de combustão interna

Estes sistemas são largamente empregados em pequenas e médias unidades de cogeração com aplicações em escolas, hotéis, hospitais e indústrias

[1, 4]. A eficiência global dos motores de combustão interna baseada em sistemas de cogeração pode alcançar uma faixa de 85 a 90%, enquanto a sua eficiência elétrica se situa entre 28 a 40% [3]. Para uso doméstico a disponibilidade de um motor de combustão interna ainda é muito pequena, devido essencialmente a falta de um motor de pequeno deslocamento com um sistema de refrigeração a água e algumas características como: operação contínua, vida útil, peso, etc., adequadas para a cogeração [1].

1.2.2

Sistemas baseados em célula de combustível

A célula de combustível, dentre as tecnologias emergentes, desponta com um grande potencial para a cogeração. Algumas das principais vantagens desta tecnologia são: baixo nível de ruído; potencial para baixa manutenção; baixas emissões e possibilidade de alcançar uma eficiência global na ordem de 85 a 90%, mesmo para pequenas unidades [3].

Atualmente, a célula de combustível com membrana de permuta de próton tem sido a tecnologia preferida entre os projetos de microcogeração. Este tipo de célula de combustível opera a temperaturas acima de 90°C, o que evita o problema em relação ao seu material de uso, permitindo, por exemplo, usar folha de plástico como eletrólito [1].

O desempenho das células de combustível depende tanto do tipo de combustível quanto da sua capacidade. Para as células de combustível de óxido sólido, que operam a temperaturas entre 950 e 1000°C [3], encontra-se uma eficiência elétrica de 40% [1], enquanto que a eficiência para as células com membrana de permuta de próton se situa um pouco mais abaixo.

1.2.3

Sistemas baseados em motor Stirling

Os motores Stirling baseados em sistemas de microcogeração tem alguns benefícios em relação ao motor de combustão interna: combustão externa contínua; alta eficiência termodinâmica; redução de ruído e longo intervalo de manutenção. Existem duas tecnologias básicas para o motor Stirling disponível para a microcogeração: “crank-driven” e pistão livre, este último pode imediatamente produzir energia elétrica em AC compatível com a rede. A sua eficiência elétrica para diferentes aplicações varia entre 10 e 35% enquanto a sua eficiência total varia entre 70 e 90% [1].

1.2.4 Trigeração

Conforme referenciado em [10], a trigeração pode ser definida como a produção combinada de três formas úteis de energia (eletricidade, calor e frio) a partir de uma única fonte de energia preliminar.

Esta forma de cogeração permite ter uma maior flexibilidade operacional nos lugares em relação às demandas de energia (calor / frio) [4]. A trigeração acompanha também as grandes tendências e mudanças do mundo moderno, inclusive no que diz respeito à maximização da eficiência energética e diminuição do impacto ambiental [10].

1.3 Descrição tecnológica

Nas seções seguintes estão apresentadas as especificações técnicas dos principais equipamentos referentes ao sistema de cogeração empregado no presente trabalho.

1.3.1 Microturbina

A microturbina é uma pequena central elétrica que gera eletricidade a alta rotação, é constituída de um compressor, turbina e um gerador. onde estão posicionados em um simples eixo e um combustor conforme ilustração na Fig. 5. Devido ao seu tamanho compacto, a sua instalação se adequa em locais com espaço limitado.

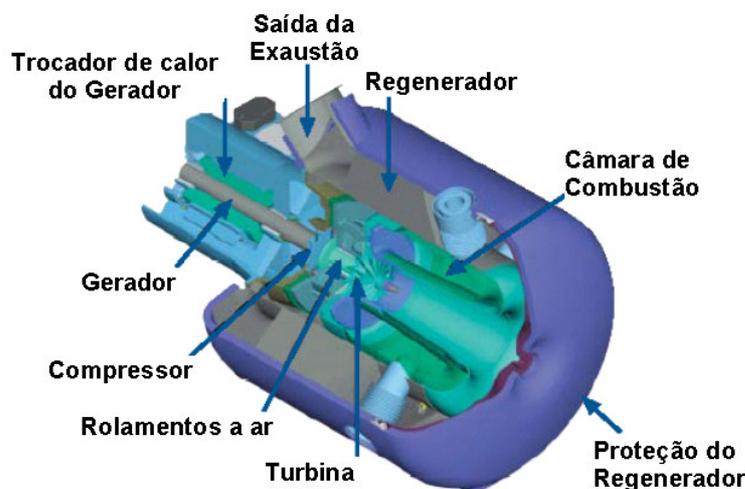


Figura 5 – Detalhe da Microturbina C30 Capstone®
Fonte: Capstone

O conjunto turbina/compressor aciona um gerador de imã permanente que produz uma tensão variada, e uma corrente alternada de alta frequência de 1600 Hz (nominais), em carga máxima. 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 frequência da rede de 60 Hz [11]. As principais especificações da microturbina se encontram no Anexo 1.

Pode-se citar dentre as características das microturbinas as seguintes vantagens e desvantagens:

a) Vantagens:

- Alta confiabilidade devido ao pequeno número de partes girantes;
- Instalação simplificada;
- Baixo custo de manutenção;
- Tamanho compacto;
- Baixo peso;
- Níveis de ruído aceitáveis;
- Preços competitivos quando compradas em quantidade;
- Baixas emissões;
- Alimentação com gás natural, flexibilidade para outros combustíveis;
- Alta temperatura de exaustão para recuperação de calor;
- Boa qualidade da energia elétrica.

b) Desvantagens:

- Custos;
- Tecnologia emergente.

1.3.2 Unidade recuperadora de calor

A unidade consiste basicamente em um trocador de calor composto por um conjunto de tubos de aço inoxidável aletados, cujo interior circula água enquanto que os gases de exaustão da microturbina fluem entre o conjunto de tubos. A temperatura da água é controlada através de um dispositivo mecânico direcionador dos gases, acionado por um atuador elétrico através de um controlador. Neste controlador se ajusta a temperatura desejada na água de saída, o mesmo recebe um sinal elétrico de uma termoresistência que detecta o valor da temperatura da água, permitindo assim, direcionar os gases admitidos

para que façam a troca de calor ou um “by pass” enviando-os diretamente ao meio ambiente [12].

As principais especificações da unidade recuperadora de calor se encontram no Anexo 2.

1.3.3 Reservatório térmico (Boiler)

O reservatório térmico ou “boiler” como é mais popularmente conhecido, é o componente do sistema de cogeração responsável pelo armazenamento da água quente. Deve possuir boas características de resistência à corrosão e bom isolamento térmico, a fim de garantir o armazenamento da água quente pelo maior tempo possível. Os boilers encontrados no mercado geralmente são compostos por: i) tanque interno, podendo ser fabricados com materiais como cobre, aço inoxidável ou polipropileno; ii) camada de isolante térmico (poliuretano expandido); iii) capa de proteção externa. Alguns reservatórios térmicos são dotados de uma ou mais resistências elétricas conjugadas com um termostato, que garantem o suprimento de água quente para uma eventual necessidade.

As principais especificações do reservatório térmico (boiler) se encontram no Anexo 2.

1.4 Análise do problema

A maior parte de geração de energia elétrica no Brasil é ainda produzida pelos recursos hidráulicos, correspondendo a 95% do fornecimento de energia. O Brasil, apesar de estar provido de grande potencial hidráulico ainda inexplorado, infelizmente, sofre com a falta de investimentos neste setor, e além do mais a viabilidade de projetos deste porte estão cada vez mais sendo condicionados a trâmites de ordem regulatória, econômica e, principalmente, relacionada com as questões sócio-ambientais. A tudo isto ainda pode ser somado outro agravante, que é a necessidade de altos investimentos em linhas de transmissão de energia.

Com o propósito de reduzir as vulnerabilidades do sistema de fornecimento de energia elétrica e um alto custo das tarifas de energia, a implantação de

outros sistemas de geração de energia tem se tornado alvo entre vários setores, destacando-se entre elas, os sistemas de cogeração, utilizando o gás natural.

Diante do crescente consumo de gás natural, o Brasil vislumbra uma promissora expansão no mercado de exploração e comercialização de gás natural, inclusive com a descoberta de recentes reservas, como a encontrada na Bacia de Santos. Juntamente com a ampliação da malha de gasodutos, em especial a construção do gasoduto Brasil-Bolívia, novos estudos e projetos se encontram em pauta no país, sobretudo no setor de energia, um dos principais alicerces para o desenvolvimento econômico.

Atualmente um grande interesse em sistemas de cogeração vem se intensificando, sendo manifestado por empresas de diferentes setores, principalmente às do setor de fornecimento de energia elétrica. Dentre estes sistemas, a cogeração com microturbina a gás natural tem-se destacado como uma tecnologia bastante difundida e utilizada no exterior, e que diante de nossa realidade motivou este trabalho de forma a analisar o desempenho de um sistema de cogeração com uma microturbina a gás natural com capacidade nominal de 30 kW.

1.5 Objetivo

O objetivo desta dissertação teve como prioridade a análise do desempenho de um sistema de cogeração com uma microturbina a gás natural de 30 kW, que visou um melhor conhecimento do seu funcionamento de forma a simular e avaliar situações de uso da cogeração perante às influências tanto no seu aspecto técnico quanto econômico.

Inicialmente foi analisado um estudo preliminar da viabilidade econômica para o fornecimento de energia elétrica para a PUC-Rio junto com a utilização da energia térmica liberada pela microturbina a gás, originando então o Sistema de Cogeração, onde o fornecimento de água quente será destinado para o consumo nos chuveiros do Ginásio da PUC-Rio.

Na segunda etapa do trabalho, após todas as instalações necessárias, terá o início dos procedimentos experimentais, onde medições dos principais parâmetros serão feitas, como temperatura, pressão, vazão, potência elétrica, tensão elétrica, etc., juntamente com a obtenção de dados da composição do gás natural fornecido pela concessionária local, CEG, essenciais para a análise.

Para a análise deste trabalho tomou-se como referência a metodologia desenvolvida por Assunção [13]. O estudo da cogeração será abordado para diferentes regimes de funcionamento da microturbina (simulação experimental).

Foi desenvolvido também um modelo numérico utilizando a equação da energia em função do tempo para analisar o desempenho da cogeração em diferentes condições de operação da microturbina e com diferentes vazões de consumo de água quente. Finalmente foi realizado um estudo de viabilidade econômica focado em dois casos gerais de cogeração através de resultados simulados.

1.6 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos da seguinte forma:

Capítulo I, *Introdução*, onde apresenta-se uma síntese da cogeração, dos ciclos mais utilizados, do estado da arte de algumas tecnologias para cogeração, conceito e aplicação da tecnologia ao sistema de cogeração proposto, descrição do teste, e finalmente o objetivo desta análise.

Capítulo II, *Fundamentos Teóricos*, estão apresentados os conceitos para a análise termodinâmica, da transferência de calor do sistema de cogeração, do modelo numérico utilizado e os conceitos para a avaliação da microturbina em relação à parte elétrica.

Capítulo III, *Procedimento experimental*, apresenta-se um resumo das características dos principais instrumentos utilizados para a obtenção dos parâmetros e os esquemas para a medição.

Capítulo IV, *Metodologia de teste*, define-se os métodos aplicados e desenvolvidos assim como as incertezas específicas de cada aplicação.

Capítulo V, *Simulação do sistema de cogeração*, descreve-se as simulações propostas e o desenvolvimento para a modelagem do sistema de cogeração.

Capítulo VI, *Resultados*, apresenta-se os resultados encontrados juntamente com as análises específicas e incertezas.

Capítulo VII, *Conclusões*, finalmente são apresentadas as conclusões e algumas recomendações.