

# Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída

A. M. Carvalho<sup>\*</sup>, C. H. F. da Silva<sup>\*</sup>, E. E. S. Lora<sup>\*\*</sup>, M. A. R. Nascimento<sup>\*\*</sup>, O.J.Venturini<sup>\*\*</sup>,  
R.V.Andrade<sup>\*\*</sup>, V.R.M.Cobas<sup>\*\*</sup>

**Resumo-** A geração distribuída - GD consiste na geração de energia próximo onde essa é utilizada. Essa modalidade de geração vem sendo introduzida no mundo apoiada na abertura dos mercados do setor elétrico, de gás e de petróleo, além de ser impulsionada por questões ambientais, amadurecimento e custos das tecnologias aplicadas a esse tipo de geração. Através de equipamentos de GD é possível atender a algumas condições de demanda de forma rápida e com custos econômico, social e ambiental aceitáveis, desde que se tenha no local o combustível adequado. Este artigo trata dos desenvolvimentos em GD, compostos basicamente por: microturbinas a gás, motores Stirling e células a combustível de óxido sólido realizados dentro do projeto de P&D Cemig/Aneel 001. Os resultados indicam que a aplicação de GD é promissora, tanto operando com combustíveis convencionais como o de fontes renováveis.

**Palavras-chave—** Microturbina, Motor Stirling, Célula a Combustível, Gaseificação, Geração Distribuída

## I. INTRODUÇÃO

A demanda mundial pela energia vem crescendo continuamente. No Brasil estima-se que a demanda por energia elétrica possa duplicar nos próximos 25 anos, exigindo uma expansão da potência instalada a curto e médio prazo.

A utilização da GD apresenta-se como uma alternativa para as concessionárias atenderem a expansão da demanda em algumas regiões afastadas do centro de carga do sistema elétrico, desde que se consiga contar com o adequado suprimento de combustível no local. As soluções tradicionais para o aumento na capacidade de geração, transmissão e distribuição necessitam na maioria das vezes de elevados investimentos e obras demoradas, que requerem um tempo grande para serem finalizadas.

As novas tecnologias de GD têm permitido a expansão da geração de eletricidade em pequena escala. Além disso, a desregulamentação do setor energético, o incentivo à produção independente de energia elétrica e a crise energética têm aumentado a procura por unidades de geração de rápida instalação e de menor impacto ambiental [1]-[2]. Este cenário apresenta condições favoráveis para avanços tecnológi-

cos e posiciona a geração distribuída (GD) como uma oportunidade de atendimento da expansão do sistema elétrico a custos competitivos com as tecnologias convencionais em aplicações específicas.

De maneira geral a Geração Distribuída (GD) pode ser definida como sendo qualquer unidade de geração de eletricidade a pequena ou média escala localizada perto dos consumidores, podendo estar conectada à rede de distribuição ou diretamente ao consumidor. O enfoque da GD pode ser situado como um modelo complementar ou alternativo de unidades de geração para novas necessidades. A GD pode contribuir também para a ampliação da potência de reserva ou emergência, para a minimização do pico de carga e para o atendimento de comunidades isoladas. Foram realizadas durante o projeto as avaliações experimentais da geração termelétrica em pequena escala, considerando microturbinas a gás, microturbina a líquido orgânico, motores Stirling e as células a combustível. De forma a fazer uso dessas tecnologias dentro dos requisitos de sustentabilidade, ambientais e sócio-econômicos, procurou-se também priorizar a utilização de combustíveis renováveis. Para tanto foram desenvolvidos equipamentos para gaseificação de biomassa, bem como algumas fornalhas para usos específicos com os motores Stirling. Visando melhor aproveitar o conteúdo energético dos combustíveis utilizados nas microturbinas a gás, aproveitamento dos gases de exaustão, foi avaliado o comportamento de sistemas de geração de água quente e água gelada (chiller de absorção), integrados a microturbinas a gás.

Este artigo apresenta os desenvolvimentos realizados em geração distribuída e indica as tendências para a pesquisa futura, tendo como referência, o projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 001 – Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com microturbinas a gás, motores Stirling e células a combustível para geração de eletricidade.

## II. P&D CEMIG/ANEEL 001

Este foi um projeto com idéias bastante inovadoras e ambiciosas, iniciado no ciclo 1999 e concluído em 2006, dentro do programa de projetos de P&D CEMIG/ANEEL, cujos principais objetivos são destacados a seguir:

- Determinar o desempenho de microturbinas a gás de 30 kWe utilizando diferentes combustíveis;
- Determinar o desempenho de um motor Stirling de 1 kWe utilizando biomassa como combustível;
- Determinar o desempenho de uma SOFC utilizando gás

Este trabalho foi desenvolvido dentro do Programa P&D CEMIG/ANEEL.

<sup>\*</sup>A. M. Carvalho e C. H. F. da Silva trabalham na Cemig Geração e Transmissão SA (e-mail: [amartins@cemig.com.br](mailto:amartins@cemig.com.br); [chomero@cemig.com.br](mailto:chomero@cemig.com.br)).

<sup>\*\*</sup> E. E. S. Lora, M. A. R. Nascimento, V.R.M.Cobas, O.J.Venturini, R.V.Andrade trabalham na UNIFEI (e-mail :[electo@unifei.edu.br](mailto:electo@unifei.edu.br) ; [marcoantonio@unifei.edu.br](mailto:marcoantonio@unifei.edu.br), [vlad@unifei.edu.br](mailto:vlad@unifei.edu.br); [osvaldo@unifei.edu.br](mailto:osvaldo@unifei.edu.br), [ruben@unifei.edu.br](mailto:ruben@unifei.edu.br) )

natural como combustível e analisar as possibilidades de uso de outros combustíveis gasosos;

- Definir os parâmetros para operação integrada de sistemas gaseificador-microturbina a gás;
- Avaliar a utilização destes sistemas para atender a consumidores rurais;
- Realizar uma avaliação técnico-econômica detalhada de diferentes sistemas de geração comercial de energia elétrica em pequena escala;
- Desenvolver sistemas de limpeza do gás, a fim de adequar sua qualidade aos requerimentos das microturbinas;
- Estudar as modificações construtivas que se requerem na câmara de combustão para a operação da microturbina com gás de baixo poder calorífico, bem como seu efeito sobre a eficiência da turbina;
- Avaliar o desempenho de chiller de absorção integrado a microturbina a gás;
- Avaliar o desempenho de uma microturbina a líquidos orgânicos de 3 kW;
- Estudar a dependência que existe entre os parâmetros de operação do gaseificador e a qualidade do gás.
- Avaliar a possibilidade de algumas tecnologias operando em ciclo combinado;
- Avaliar um motor Stirling de 9 kW operando com diferentes combustíveis.

Este projeto teve um custo total de aproximadamente R\$2.000.000,00 e proporcionou a obtenção de experiências e conhecimentos em geração distribuída, promoveu capacitação de recursos humanos no assunto e a interação de diversas instituições de pesquisa, gerou publicações científicas com participações em diversos fóruns de discussão, além de contribuir significativamente para a criação/reconhecimento do centro de excelência em geração distribuída em Itajubá (NEST/UNIFEI).

Alguns aspectos que de maneira geral afetam qualquer projeto de pesquisa são: a dificuldade de se encontrar e adquirir equipamentos, principalmente se os mesmos forem importados, considerando que alguns destes se encontram apenas em fase inicial de comercialização ou em etapa de demonstração, atrasos por diversas causas e freqüentes necessidades de adaptações exigidas para a correta implementação do processo [3].

### III. RESULTADOS OBTIDOS – P&D CEMIG/ANEEL 001

#### A. Microturbinas a Gás

Além das baixas potências, existem características que distinguem as microturbinas das turbinas industriais e das mini turbinas, como apresentado a seguir [32]:

- Turbinas inicialmente projetadas para aplicações comerciais;
- Elevada e variável velocidade de rotação, entre 33000 e 120000 rotações por minuto;
- O gerador de corrente contínua opera à velocidade da turbina com um inversor acoplado;
- Não usam caixa redutora, a turbina e o gerador estão

acoplados no mesmo eixo;

- É utilizado um recuperador para aquecer o ar de entrada para manter a temperatura elevada internamente.

Como principais vantagens das microturbinas pode-se citar:

- Alta durabilidade;
- Projeto simples, permitindo redução de custos e grandes volumes de fabricação;
- Trabalham com baixas pressões;
- São compactas, fáceis de instalar e de reparar;
- Eficiência razoável (30-33%);
- Baixas emissões;
- Permitem cogeração e modularidade;

Como barreiras para sua popularização pode-se citar: alto custo, eficiência com cargas parciais questionáveis, experiência limitada com o uso dessa tecnologia e ruídos de altas frequências.

Foram adquiridas 2 microturbinas Capstone, sendo uma a diesel e outra a gás.

Foi determinado o desempenho de microturbinas a gás usando gás natural e óleo diesel e um estudo de avaliação econômica deste equipamento em operações de base, cogeração e horário de ponta [2], [4]-[9]. Os resultados indicam que as microturbinas respondem de forma rápida à demanda e apresentam um bom desempenho. Microturbinas a gás natural possuem melhor eficiência de combustão e constituem-se em uma boa opção com relação ao aspecto ambiental.

Foi realizada também a modelagem matemática de uma microturbina utilizando técnicas de identificação de sistemas, como por exemplo os modelos ARX, ARMAX e Box-Jenkins e em seguida a simulação de controle dos parâmetros do equipamento considerando o mesmo operando como carga isolada e em rede interligada [10]. Os modelos foram validados por dados experimentais e apresentaram um desempenho aceitável. Foi avaliado durante o estudo o comportamento da operação em rede interligada.

Testes preliminares da microturbina com biomassa gaseificada mostraram que seria difícil conseguir operá-la unicamente com este combustível. O desempenho das microturbinas com biomassa gaseificada encontra-se atualmente em estudo nos laboratórios do NEST/UNIFEI. Contudo utilizando modelos matemáticos obtidos durante este projeto de P&D e o software CFX foram avaliadas as conseqüências e modificações necessárias da queima de gás de baixo poder calorífico nas microturbinas [11]-[16]. Nestes estudos é possível visualizar as influências dos principais parâmetros de uma câmara operando com combustível gasoso, projetar um combustor com as condições impostas pelo usuário, analisar as emissões do combustor de óxido de nitrogênio, pesquisar a capacidade de modificação de câmara de combustão já existente, avaliar o comportamento da chama de uma câmara de combustão para o caso de microturbina a gás utilizando combustíveis de baixo poder calorífico.

Para funcionamento de microturbina com gás de biomassa exige-se uma alta vazão de combustível na câmara de combustão para obtenção de determinada potência elétrica, sendo assim necessário um aumento nas dimensões da câmara para garantir melhor desempenho do equipamento. A Figura 1 mostra a microturbina a gás estudada.

Foi realizado o acoplamento físico da microturbina com o chiller de absorção. Foi necessária também da instalação de equipamentos auxiliares da microturbina e da instrumentação. O sistema foi modelado matematicamente e posteriormente comissionado. Maiores detalhes serão apresentados em seção específica.



Figura 1 – Microturbina a gás – Laboratório NEST/UNIFEL.

As microturbinas a gás natural da Capstone possuem um sistema mais eficiente de combustão em comparação com as microturbinas a diesel, chamado de queima em regime pré-misturado. Isto implica em duas conseqüências: Melhor eficiência térmica e nível de emissão de  $\text{NO}_x$  mais baixo. Entretanto as microturbinas a diesel ainda apresentam emissões inferiores em comparação com as emissões de outras tecnologias de geração de eletricidade com óleo diesel. No cenário brasileiro atual as microturbinas já apresentam viabilidade atendendo cargas de pico e carga de base, principalmente naqueles estados cujas distribuidoras de gás natural têm praticado tarifas de incentivo. Espera-se uma melhor viabilidade no investimento com microturbinas em função de três fatores [2]:

- produção de microturbinas em grande escala e conseqüente queda no custo de investimento;
- crescente aumento da tarifa de energia elétrica das concessionárias no Brasil;
- tendência de incentivo a cogeração de pequeno porte pelas distribuidoras de gás natural

#### B. Gaseificação de Biomassa

O potencial energético de biomassa é enorme, tanto em escala mundial, como no Brasil. Por isso é grande o interesse pela gaseificação de biomassa e pelos sistemas de ciclos combinados gaseificador/turbina a gás. A gaseificação é a conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a elevadas temperaturas. O gás produzido é conhecido como gás pobre e possui contaminantes tais como: partículas sólidas, alcatrão, metais alcalinos, dentre outros, que devem ser removidos, uma vez que são po-

tencialmente prejudiciais às operações dos equipamentos que utilizam deste gás. A gaseificação apesar de ser mais complexa que a combustão direta, apresenta algumas vantagens, como por exemplo: a geração de eletricidade em pequena escala, sem a necessidade de um ciclo vapor, obtenção de eficiências comparáveis as de centrais térmicas a carvão, quando operando em ciclo combinado (BIG-CC) [23]. Geralmente se considera que a faixa de potência de 100 kW a 5 MWe é mais viável para a produção de energia elétrica, dependendo do tipo de gaseificador utilizado.

Foi projetado e construído um gaseificador de biomassa com potência térmica de 245 kW, juntamente com toda a instrumentação/medição necessária para o seu uso [17] a fim de pesquisar e desenvolver o tema dentro deste projeto. O sistema de gaseificação é mostrado na Figura 2.



Figura 2 – Gaseificador de biomassa construído – Laboratório NEST/UNIFEL.

O sistema de gaseificação completo é composto basicamente por: silo, sistema para alimentação da biomassa, queimador, sistema de resfriamento na camisa, ciclone com trocador de calor, sistema 'quench' para resfriamento, lavador de gases tipo Ventury. A utilização dos gases resultantes de um processo de gaseificação, em uma microturbina a gás, por imposição tecnológica deve operar com baixas concentrações de contaminantes. Tal fato se deve aos danos que os mesmos podem causar aos equipamentos, tais como corrosão, erosão e deposição.

O sistema de lavagem dos gases projetado e construído é composto de um ciclone de alta eficiência Stairmand associado a dois lavadores de gás do tipo Ventury com spray pré-formado projetado a partir do modelo de Yung. Ele consegue remover a maior parte dos particulados, garantindo assim que as características dos gases estejam dentro das especificações para uso na turbina a gás [18]. Além destes o sistema ainda possui separador e compressor e soprador.

Foi realizada avaliação experimental do gaseificador considerando leito fluidizado borbulhante para biomassa. Foi também projetado e construído este sistema para medição de teor de alcatrão antes e depois do sistema de lavagem dos gases, a fim de se determinar a eficiência na remoção de alcatrão, garantindo que os limites da substância residual estejam dentro dos limites de tolerância das microturbinas.

O sistema de medição completo composto por: linhas de amostragem, filtro cerâmico, bombas, medidor de gás, sonda, filtração, lavagem do gás, contas de vidro, solvente, banho frio e frascos de amostragem [19].

Resultados dos testes de desempenho deste sistema encontram-se em [20]-[23] e demonstram que o rendimento do equipamento varia entre a faixa de 57 à 75%, dependendo da temperatura de operação, obtendo um gás com composição aproximada da seguinte forma: 8,0-14,0 % CO, 2,5-0,0 % H<sub>2</sub>, 5,0-4,0 % CH<sub>4</sub>. Este gás produzido possui um poder calorífico inferior (PCI) aproximadamente dentro da faixa de 3,8-1,4 MJ/m<sup>3</sup>. O teor de particulados e alcatrão no gás (valor médio): 11,26 e 1,18 g/Nm<sup>3</sup> respectivamente, quando operando com casca de arroz. Testes com bagaço de cana e serragem também foram realizados.

De maneira geral, as conclusões deste trabalho podem ser resumidas da seguinte forma: o sistema de alimentação de biomassa para o gaseificador constitui em um importante fator para a estabilidade operacional do gaseificador e em seu desempenho; o sistema de injeção também é fundamental para a operação e não pode ser uma limitação na flexibilidade do gaseificador. O sistema de gaseificação após modificações necessárias durante os testes preliminares [24] encontra-se operacional e mostra capacidade de operar por um tempo relativamente longo [25].

### C. Célula Combustível de Óxido Sólido

As células a combustível são similares às baterias, usam um processo termoquímico para obter corrente contínua a baixa tensão [23]. Uma célula combustível é composta por dois eletrodos separados por um eletrólito. O hidrogênio passa através do anodo e o oxigênio através pelo catodo. Quando o hidrogênio é ionizado ao passar pelo anodo, perde seus elétrons e ao ocorrer é transportado pelo eletrólito para o catodo, onde reagirá com o oxigênio formando água. Uma vez que para este processo ocorrer se faz necessária a conexão elétrica entre o catodo e o anodo produz-se energia elétrica. Existe a necessidade de hidrogênio disponível para a operação da célula. Entretanto células a combustível de alta temperatura, como por exemplo, células de óxido sólido, permitem que a reação de reforma aconteça internamente, podendo assim ser alimentado como combustível o gás metano ou etanol, dentre outros possíveis combustíveis.

As células a combustível oferecem várias vantagens sobre a geração de eletricidade, baseada na conversão termomecânica da energia dos combustíveis, estas incluem [23]:

- Elevadas eficiências, que podem chegar a ordem de 30% sobre outras tecnologias que usam combustíveis fósseis;
- Ampla aceitabilidade ambiental;
- Modularidade e rápida instalação;

- Flexibilidade de combustíveis;
- Possibilidade de cogeração;

Dentre as desvantagens pode-se citar: elevados custos iniciais; escasso pessoal especializado nesta tecnologia, dificultando a manutenção; alta sensibilidade a impurezas contidas nos combustíveis e pouca experiência na operação do equipamento.

Foi adquirida uma célula combustível de óxido sólido (SOFC) de 5 kWe. Durante o transporte da fábrica até o local de montagem no NEST em Itajubá houve impacto e inclinação na mesma detectados por sensores. A célula passou por montagem e ajustes por técnico especialista enviado pelo fabricante para verificação de seu estado e comissionamento. A Figura 3 mostra a SOFC montada no laboratório de pesquisa.

A redução da capacidade da célula combustível em relação ao projeto inicial impediu o acoplamento dessa à microturbina devido inexistência de equipamentos com baixa capacidade no mercado.



Figura 3 –Célula de óxido sólido – Laboratório NEST/UNIFEI.

O acoplamento dos equipamentos na potência em que foram adquiridos exigiria a pressurização da célula a combustível. Esse procedimento além de proibido pelo fabricante, é na realidade tecnicamente inviável.

Os resultados de estudos de modelagem e simulação, considerando a integração da célula com microturbinas a gás em ciclo combinado encontram-se em [26]. Foram avaliadas as influências de temperatura e pressão na operação da SOFC, considerando a operação isolada e integrada com a microturbina. Em sistemas híbridos, os estudos mostraram que é possível reduzir a área da célula mantendo elevadas

eficiências se comparando com a SOFC operando isolada. O modelo unidimensional desenvolvido permite corrigir os dados obtidos com os modelos simplificados e achar coeficientes de correlação que corrigem dados obtidos na modelagem da SOFC. Foram utilizados dados experimentais obtidos das microturbinas para a simulação do sistema integrado SOFC/microturbina.

#### D. Motor Stirling

Dentro do atual contexto energético mundial, o uso de motores Stirling vem despertando interesse, principalmente devido à sua característica de motor de combustão externa, conforme mostra a Figura 4, sendo possível à utilização de diversos combustíveis, pois se necessita apenas de uma fonte quente, independente do tipo de combustível, sendo possível inclusive o uso de energia solar, como fonte de calor [27]. A utilização destes equipamentos como GD também vem sendo discutida, se mostrando como mais uma opção para aumentar o acesso à eletricidade para a população que vive em comunidades isoladas. Este motor sempre contém um gás pressurizado no seu interior, que é chamado de gás de trabalho. A potência é gerada não pela queima explosiva do combustível no cilindro, mas pelo aquecimento e resfriamento do gás de trabalho pelo lado externo do cilindro.

O motor Stirling, previamente testado com GLP e gás natural, sofreu modificações para testes com biomassa [27]-[28]. As características da operação de motores Stirling com biomassa foram estudadas e os resultados encontram-se em [29]. Foram necessárias várias modificações nos dutos, câmara de combustão e sistema de controle do motor Solo para adaptá-lo à operação com biomassa. No caso do motor Viebach se fez necessária à modificação do sistema de alimentação da biomassa, a fim de garantir a estanqueidade do mesmo, e foi implementado um pré-aquecedor de ar, cujos resultados encontram-se descritos em relatório específico [30]. A Figura 5 e 6 mostram os motores estudados.

Atualmente, na base da experiência adquirida no P&D CEMIG/ANEEL 001, construí-se um protótipo fornalha/Motor Stirling para biomassa dentro do P&D 123 – Sistema Gerador de Energia com motor Stirling.



Figura 4 – Motores Stirling Viebach- – Laboratório NEST/UNIFEI



Figura 5 – Motores Stirling Solo- – Laboratório NEST/UNIFEI.

#### E. Microturbina a Líquido Orgânico

Uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a biomassa com capacidade de 3 kW foi também testada, dentro do enfoque de avaliação de pequenas unidades de GD. O combustível desta máquina pode ser diferentes resíduos agrícolas, como por exemplo: casca de café, serragem, cavaco de madeira e folha. Os interesses foram: treinamento em operação com tecnologia de termelétrica a ciclo Rankine, a líquido orgânico, demonstração da tecnologia, avaliação de desempenho e adequabilidade em GD. Foram estudadas diversas opções para a escolha do melhor local para instalação do gerador. O local considerado adequado foi à carpintaria da Escola de Formação Profissional (EFAP) de propriedade da Cemig em Sete Lagoas/MG (Figura 6). O equipamento encontra-se montado e disponível para visitação por parte do corpo técnico da empresa e demais interessados. Foram realizados os testes de desempenho e os resultados de desempenho encontram-se em [31] e os principais pontos são discutidos abaixo.



Figura 6 – Microturbina a Líquido Orgânico instalada na EFAP, em Sete Lagoas/MG.

O equipamento é constituído de 2 partes separadas e a sua instalação é muito simples, conforme orientação técnica do fabricante. A unidade é capaz de operar automaticamente, desde que seu compartimento de alimentação tenha suficiente quantidade de biomassa combustível. Ela trabalha a baixas temperaturas e pressão. Pode-se alimentar 6 linhas

monofásicas, como carga máxima de 500 W por linha, para suprimento de cargas típicas em 60 Hz e 110 Vca. Permite-se modularidade, não há necessidade de respaldo de grandes bancos de baterias e não depende de condições climáticas.

Durante a partida do sistema foi ministrado curso para os técnicos da empresa na operação do equipamento pelo fabricante. A unidade foi alimentada com serragem adquirida das marcenarias locais, sem qualquer tratamento e colocada diretamente no reservatório de biomassa com capacidade de 1,3 m<sup>3</sup>. A operação da unidade é muito simples, mas exige a presença de pessoas capacitadas na análise de parâmetros e informações disponíveis na máquina. Após 50 minutos em que é colocada a chama na câmara de combustão, realiza-se a geração.

Em seu funcionamento, o gerador alimentou diversas cargas, tais como: iluminação, geladeira, serra elétrica, furadeira, banco de cargas indutiva, capacitivas e resistivas. A retirada de cargas conforme prioridade pré-programada foi alvo de testes e com comportamento satisfatório. A unidade foi operada por diversos dias seguidos, com vários dias de pausa, partidas e paradas no mesmo dia e em regime contínuo. Alcançou a potência de 2860 W sem perturbações. O sistema trabalhou isolado da rede elétrica local, simulando um atendimento de GD. Durante a avaliação de desempenho houve a necessidade de manutenções com: troca de material refratário, troca de peças do sistema de controle e desparamentização da máquina.

#### F. Chiller de Absorção

Os sistemas de cogeração integrando microturbinas e chiller de absorção são considerados como uma alternativa razoável para a geração de energia elétrica e resfriamento [33]. Estes sistemas são atrativos devido à economia energética que proporcionam, resultado da recuperação de calor dos gases de saída da microturbina, ao aumento do uso de gás natural no mercado brasileiro e a necessidade de redução de impacto ambiental. Como desvantagens para o uso destes sistemas pode-se citar: a falta de conhecimento e experiência na operação destes sistemas.

Foi realizada a conexão de um chiller de absorção de simples efeito, LiBr-H<sub>2</sub>O de 10 TR de capacidade calorífica, fabricado por Thermax a uma microturbina Capstone de 30 kW através de um trocador de calor. A montagem foi feita nos laboratórios do NEST/UNIFEI e é mostrada nas Figuras 7-8.



Figura 7 – Chiller da Absorção, Laboratório NEST/UNIFEI.



Figura 8 – Chiller da Absorção acoplado a Microturbina a gás, Laboratório NEST/UNIFEI.

Testes no sistema obtiveram um valor para a eficiência do sistema (COP) da ordem de 0,43. Este valor é compatível com valores encontrados na literatura. É possível considerar esse valor satisfatório, tendo como base os limites estabelecidos para uma central de cogeração, a potência da microturbina e a temperatura de água quente de entrada no chiller.

#### G. Avaliação Econômica

A Tabela I apresenta o custo de geração e o preço de mercado dos equipamentos. Os custos foram calculados supondo-se uso próprio, fator de capacidade de 91%, vida útil dos equipamentos de 10 anos e custo médio ponderado de capital de 15%. Foi considerado um custo de importação da ordem de 70%. Os valores dos combustíveis foram obtidos em maio/2007.

TABELA I  
CUSTO DE GERAÇÃO EM TECNOLOGIAS DE GD

Tecnologia	MT GN	MS GN	MS RE	MCI GN	MCI OD	GB	CH
Preço do equipamento US\$/kW	1400 (*)	2200 (*)	2200 (*)	700 (*)	1600 (*)	2400	4700 (*)
Custo da energia R\$/MWh	330	360	117	250	243	388	290 <sup>#</sup>

Legenda:

- Combustíveis:  
GN (gás natural) - OD (óleo Diesel) - RE (resíduos)
- Tecnologias:  
MT – Microturbina;  
MS – Motor Stirling  
MCI – Motor de Combustão Interna  
GB – Conjunto Gaseificador/Motor/Gerador  
CH – Chiller de Absorção acoplado à MT com sistema de troca térmica

(\*) Equipamento importado.

# - Aproveitamento de frio

#### IV. DIREÇÕES PARA PESQUISA

Os equipamentos adquiridos para este projeto foram instalados nos laboratórios do NEST/UNIFEI ou em instalações da CEMIG, por se tratarem de tecnologias em desenvolvimento que não se apresentam suficientemente maduras e confiáveis para serem disponibilizadas para atender consumidores rurais em comunidades isoladas.

Neste projeto foram realizadas avaliações experimentais de sistemas de geração distribuídas de energia elétrica: microturbinas, motores Stirling, microturbina a líquido orgânico e células a combustível, assim como de gaseificadores e fornos de biomassa. Foi avaliado também o comportamento de um chiller de absorção interligado a uma microturbina a gás. Devido às limitações técnicas de operação dos equipamentos, somente foram realizadas simulações teóricas do desempenho desses equipamentos operando em ciclo combinado.

Alguns pontos podem ser ressaltados apenas para indicar algumas possíveis direções de pesquisa, baseados nos estudos executados durante este projeto, como descrito a seguir.

Estudos futuros em gaseificação de biomassa podem caminhar para: a qualidade do gás e testes de diversas biomassa considerando ainda diferentes alturas do leito [25]; desenvolvimento em novas concepções de sistema de alimentação de biomassa; analisar o comportamento do gaseificador com outro agente de gaseificação, como por exemplo vapor; implementar a instrumentação necessária para o estudo dinâmico do leito fluidizado do gaseificador [20].

Para os motores Stirling, o presente projeto indica que sejam aprofundados conceitos relacionados com a adaptação do motor a um gaseificador de biomassa e a avaliação do motor operando com gás de baixo teor calorífico [27]. Outra alternativa de pesquisa é a avaliação de motores Stirling com concentradores solares.

No caso das microturbinas a gás pode-se citar as seguintes recomendações: estudo de viabilidade de microturbinas operando em horário de pico e como gerador de emergência em hospitais, hotéis e outros casos do setor terciário, acompanhamento da tendência do crescimento do custo da energia e o seu impacto na geração distribuída, principalmente levando-se em conta o custo da energia na ponta de carga [2]; outras melhorias do sistema podem ser advindas de estudos nas reações químicas envolvidas na câmara de com-

bustão [11]; determinação de campos de temperatura, pressão e velocidade no modelo de câmara de combustão usando como combustível o gás de biomassa para a condição simulada de uma cidade; campo de temperatura e emissão de NOx na exaustão da câmara de combustão [16].

Em se tratando de SOFC, existe a necessidade ampliar os testes de laboratório, uma vez que esta tecnologia é a de mais recentes desenvolvimentos.

#### V. CONCLUSÕES

A execução deste projeto possibilitou, para o setor elétrico, a avaliação de tecnologias emergentes para geração de energia elétrica, calor e frio, a implantação na UNIFEI de um núcleo de excelência para tratar da geração termelétrica distribuída e formação de mão-de-obra especializada. O desenvolvimento proporcionado pelas pesquisas associadas pode levar a uma oferta de energia produzida de forma descentralizada e com a utilização de combustíveis renováveis e de baixo impacto ambiental. Os benefícios para a empresa (CEMIG) podem ser listados a seguir:

- Avaliação das oportunidades tecnológicas introduzidas por tecnologias emergentes, subsidiando a empresa em decisões estratégicas;
- Atendimento a clientes isolados, evitando investimentos no sistema elétrico (LT's, SE's, LD's);
- Otimização da utilização de ativos;
- Aprendizado na condução dos projetos de P&D;
- Atendimento de clientes que demandam energia de qualidade diferenciada;
- Construção de oportunidades de negócios para a empresa.
- Capacitação técnica dos empregados; Considerando os benefícios para o centro de pesquisa (NEST/UNIFEI), podem ser citados os seguintes:
  - Fortalecimento do grupo de pesquisas;
  - Laboratórios equipados conforme a necessidade da pesquisa, proporcionando a continuidade de trabalhos;
  - Reconhecimento como Centro de Excelência, conforme pode ser atestado pelos informativos da UNIFEI
  - Demanda por aplicação de cursos;
  - Participação na execução de relevantes projetos da área;
  - Participação em congressos, seminários e conferências. Durante este projeto de P&D houve a participação em 13 seminários, conferências ou congressos, sendo 12 em âmbito internacional;
  - Interação com instituições e pesquisadores;
  - Aumento da produção científica do Centro em número e relevância. Foram geradas 18 publicações científicas, sendo 13 internacionais e 5 nacionais.
  - Foram concluídas 2 teses de doutorado e 6 teses encontram-se em andamento;
  - Foram concluídas 6 dissertações de mestrado e 7 dissertações encontram-se em andamento;

- Foram realizados 3 estágios de pós-doutorado. Todos estes trabalhos/publicações encontram-se depositados na UNIFEI e na Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energética da CEMIG.

Desta forma, pode-se considerar que foram cumpridos os principais objetivos do projeto, devido à:

- Conhecimento de tecnologias operando com diferentes combustíveis. Os testes realizados permitiram definir os indicadores dos equipamentos avaliados (consumo específico de combustível, eficiência, emissões específicas e outros) para diferentes condições de operação;
- Os modelos elaborados permitiram obter resultados referentes a parâmetros de operação das microturbinas e células a combustível para diferentes configurações esquemáticas dos sistemas híbridos. Em outros casos permitiu a avaliação preliminar de sistemas operando com biomassa "in natura" e/ou gaseificada.
- Avaliação de modificações necessárias para a operação dos motores Stirling e microturbinas com biomassa.
- Formação de recursos humanos, interação entre diversas instituições científicas e divulgação dos resultados de testes das tecnologias. Muitos outros projetos de pesquisa usufruirão a estrutura do laboratório que foi montado de acordo com as necessidades deste projeto. Este item mostra-se de grande relevância principalmente levando-se em conta a carência de especialistas nestas áreas temáticas no país.

A utilização em larga escala das tecnologias de geração distribuída vai depender, além da viabilidade econômica que apresenta tendência de melhoras, do suprimento de combustíveis nas várias regiões. Neste contexto a utilização de biomassa é uma alternativa importante para o atendimento, a um menor custo, do crescimento da demanda dos mercados das concessionárias e para o desenvolvimento de áreas carentes, onde a disponibilidade de energia elétrica é baixa, justificando a relevância do estudo realizado.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda a Equipe do NEST/UNIFEI pela contribuição na elaboração deste documento.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NEST/UNIFEI, "Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto", NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 05, Junho 2000.
- [2] E. E. B. Gomes, "Análise técnico econômica e experimental de microturbinas a gás operando com gás natural e óleo diesel", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2002.
- [3] NEST/UNIFEI, "Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com células a combustível, microturbinas a gás e motores Stirling para a geração de eletricidade - Relatório final", NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 28, Junho 2006.
- [4] E. E. B. Gomes, M. A. R. Nascimento, E. E. S. Lora, P. Pilidis, A. Haszlaw, "Performance evaluation and case studies of microturbines fuelled with natural gas and diesel", *Journal of Power and Energy Proceedings of the Imech e Part A. Grã Bretanha*, v. 218, p. 599-607, 2004.
- [5] E. E. B. Gomes, E. E. S. Lora, M. A. R. Nascimento, "Case studies of distributed generation with microturbines in Brazil", In: *International Joint Power Generation Conference, Atlanta*, 2003.
- [6] E. E. B. Gomes, E. E. S. Lora, M. A. R. Nascimento, "Evaluation of microturbines emissions fueled with natural gas and diesel", In: *Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisboa*, 2003
- [7] E. E. S. Lora, M. A. R. Nascimento, E. E. B. Gomes, "Economical and Environmental evaluation of microturbines applications in Brazil", In: *International Joint Power Conference*, 2002.
- [8] F. N. Teixeira, O. J. Venturi, F. Arrieta, R. Ponce, E. E. S. Lora, M. A. R. Nascimento, V. R. M. Cobas, "Assessment of Distributed Generation for the Brazilian Case", In: *5º Latin American Congress: Electricity Generation and Transmission, São Pedro/SP*, 2003.
- [9] A. M. Carvalho, J. L. Ávila, J. H. Diniz, M. A. R. Nascimento, E. E. S. Lora, E. E. B. Gomes, V. R. M. Cobas, F. Arrieta, R. Ponce, "Avaliação experimental de microturbinas a gás e motores Stirling para geração distribuída de energia com utilização de diferentes combustíveis", In: *XVII SNPTEE, Uberlândia*, 2003.
- [10] M. A. R. Maldonado, "Modelagem e simulação do sistema de controle de uma micro-turbina a gás", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2005
- [11] L. J. M. Neto, "Projeto preliminar de uma câmara de combustão de microturbina a gás operando com gás natural e sua modificação para gás de baixo poder calorífico", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- [12] H. S. Alencar, "Estudo do comportamento da chama em câmara de combustão para microturbina a gás usando o cálculo da dinâmica de fluido - CFD", Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 38, Junho 2006.
- [13] M. A. R. Nascimento, H. S. Alencar, H. F. Villanova, "Análise do comportamento da chama em uma câmara de combustão anular usando o cálculo CFD", *COBEM 2005, Ouro Preto/MG*, 2005
- [14] H. S. Alencar, H. F. Villanova, M. A. R. Nascimento, "The mathematical approximation in numerical analysis for a combustion chamber for small gas turbine using CFD", *Wseas Transactions on heat and mass transfer, USA*, v. 1, n. 2, p. 135-143, 2006.
- [15] M. A. R. Nascimento, H. S. Alencar, H. F. Villanova, "Preliminary application of CFX as tool in the aerodynamic study of combustion chamber for gás micro turbine", *International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering Lecture Series on Computer and Computational Sciences, Netherlands*, v. 1, p. 20-24, 2004.
- [16] H. S. Alencar, M. A. R. Nascimento, H. F. Villanova, "Analysis of flame behavior in small combustion chambers using CFD", In: *18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto*, 2005.
- [17] NEST/UNIFEI, "Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto - Etapa IV", NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 12, Junho 2001.
- [18] NEST/UNIFEI, "Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto - Nº 5", NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 08, Novembro, 2000.
- [19] NEST/UNIFEI, "Avaliação técnico-econômica de tecnologias de geração distribuída com máquinas térmicas- Relatório de projeto - Nº 4", NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 07, Novembro, 2000.
- [20] S. R. S. Aguiar, "Avaliação experimental de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante para biomassa", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- [21] P. J. V. D. Enden, E. E. S. Lora, "Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB", *Biomass and Bioenergy, Elsevier Ltda. Amsterdam*, v. 26, p. 281-287, 2004.
- [22] R. V. Andrade, E. E. S. Lora, A. L. B. Suvanell, S. R. S. Aguiar, A. A. Brites, "Gaseification in fluidized bed: operational and technical evaluation of a prototype using rice husk as fuel", *Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisboa*, 2003.
- [23] E. E. S. Lora, R. V. Andrade, "Geração de energia e a gaseificação de biomassa", *Biomassa e Energia, Viçosa*, v. 1, p. 311-320, 2004.
- [24] A. L. B. Suvanell, "Relatório Final do Estágio Pós-Doutorado", Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 47, Abril, 2006.
- [25] NEST/UNIFEI, "Projeto CEMIG", NEST/UNIFEI, Itajubá, Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 48, Junho 2000.
- [26] V. R. M. Cobas, "Análise de sistemas híbridos com célula a combustível de óxido sólido e microturbinas a gás", Tese de doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- [27] R. W. Barros, "Avaliação teórica e experimental do motor Stirling Solo 161 operando com diferentes combustíveis", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2005

- [28] M. E. Corria, V. R. M. Cobas, E. E. S. Lora, "Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil", v. 34, p.3402-3408, *Energy Policy*, 2006.
- [29] M. E. C. Aradas, "Projeto: Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com células a combustível e microturbinas a gás, para a geração de eletricidade e de sistemas de geração térmica em motores Stirling", Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 53, 2006.
- [30] NEST/UNIFEI, "Modificações nas instalações dos motores Stirling Viebach e Solo para operação com biomassa", Relatório Técnico P&D CEMIG/ANEEL 001 54, 2006.
- [31] V. A. Medeiros, C. R. F. Maciel, "Experiência da CEMIG na utilização da unidade geradora de biomassa da ORMAT", CEMIG, MG, Relatório Técnico, TE/2006, 2006
- [32] V. R. M Cobas, "Análise Técnico Econômico e Normativo para Implementação da Geração Distribuída", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2000.
- [33] O. J. Venturi, "Evaluación experimental de una unidad de cogeneración de baja capacidad para su utilización en Sistemas de Generación Distribuida", Itajubá, Relatório Técnico, 2007.