

# Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling

E. L. B. Silva, B. M. Lopes, CEMIG D SA, C. H. F. Silva, CEMIG GT SA

**Resumo-** O motor Stirling é uma das tecnologias de geração distribuída com maior possibilidade de crescimento em regiões isoladas e podem operar com qualquer fonte de calor, incluindo a queima direta ou gaseificação da biomassa. Sendo a biomassa uma fonte de energia limpa e abundante, e pensando nos aspectos ambientais, essa tecnologia se faz muito promissora no âmbito de pesquisa em alternativas energéticas. Este artigo apresenta a pesquisa e desenvolvimento da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) junto com a Universidade Federal de Itajubá (NEST/UNIFEI) ocorrida dentro do projeto de P&D Cemig/Aneel 123 (Código Aneel 0049-069/2004) - Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling. Os resultados demonstram os avanços e as dificuldades no desenvolvimento do motor Stirling com tecnologia nacional.

**Palavras-chave**— Biomassa, Geração Distribuída, Motor Stirling.

## I. INTRODUÇÃO

Os crescentes danos ambientais associados aos processos de extração, processamento, transporte e utilização de combustíveis tradicionais tem levado a uma busca de alternativas energéticas renováveis que mitiguem esses danos e garantam o fornecimento de energia [1]. O motor Stirling é umas das tecnologias de geração distribuída com maior possibilidade de crescimento em regiões tropicais (elevada incidência de radiação solar e alta produtividade de biomassa) em curto prazo, devido à possibilidade de utilização de qualquer fonte de calor para seu funcionamento.

Se comparados com outras energias alternativas comumente usadas em áreas isoladas (solar e eólica, motores de combustão interna) e outras tecnologias promissoras (micro turbinas a gás e células combustíveis), os motores Stirling que usam biomassa ainda são mais atraentes, pois apresentam custos competitivos, oferecem serviços contínuos e estáveis, não precisa de outra fonte geradora auxiliar e eliminam os altos custos associados ao consumo e transporte de combustíveis fósseis.

A utilização da biomassa é uma alternativa viável, ambientalmente correta e importante para o atendimento, a um menor custo, do crescimento da demanda energética da sociedade, para a geração de emprego e renda de forma descen-

tralizada. A diversificação da matriz energética, com inserção da biomassa é uma tendência mundial e poderá ocorrer de forma acelerada no Brasil se houver um planejamento integrado de governo, de forma a viabilizar o uso desse energético com ênfase no desenvolvimento industrial e regional.

Este artigo apresenta os desenvolvimentos realizados pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D CEMIG/ANEEL 123 (Código Aneel 0049-069/2004) – Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling. Na seção II é apresentado o projeto. A seção III indica o desenvolvimento e os principais resultados desta pesquisa. Na seção IV são apresentadas as conclusões. A seção V realiza os agradecimentos e encerrando o artigo encontram-se as referências utilizadas para a elaboração deste trabalho.

## II. P&D CEMIG/ANEEL 123 (CÓDIGO ANEEL 0049-069/2004)

O P&D Cemig/Aneel 001, criado em 2000, foi um projeto bastante arrojado e ambicioso, cujo título: Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração de Eletricidade exprime a grande amplitude de seus objetivos. Neste projeto foram adquiridos, montados e testados alguns motores Stirling e testados com diversos combustíveis.

Houve durante a pesquisa modificações na câmara de combustão, no sistema de alimentação da biomassa, testes de estanqueidade, adição ao sistema de pré-aquecedor. Esse estudo teve como desdobramento um novo projeto de pesquisa (P&D Cemig/Aneel 123 (Código Aneel 0049-069/2004)) cujos propósitos foram [1]:

- Desenvolver protótipos nacionalizados de motores Stirling, com sistema de combustão de biomassa associado;
- Projetar, construir e testar uma fornalha compacta para a queima de biomassa para o acionamento de motores Stirling;
- Disseminar e contribuir para o desenvolvimento da geração distribuída;

O P&D CEMIG/ANEEL 123 (Código Aneel 0049-069/2004) se iniciou no ciclo 2003/2004 e foi encerrado em Outubro/2009. Resultou da parceria entre a Cemig Distribuição SA e o Núcleo de Excelência em Sistemas Térmicos (NEST/UNIFEI). O projeto propõe o desenvolvimento, teste e construção de um protótipo de motor Stirling adaptado para as condições de operação isolada. Indiretamente este projeto possui reflexos na realidade industrial na forma de

---

Este trabalho foi desenvolvido dentro do Programa de P&D Cemig/Aneel, Projeto nº 123 (Código Aneel 0049-069/2004).

E. L. B. Silva (e-mail: [elsonl@cemig.com.br](mailto:elsonl@cemig.com.br)), B. M. Lopes (e-mail: [bruno.marciano@cemig.com.br](mailto:bruno.marciano@cemig.com.br)) trabalham na Cemig Distribuição SA e C. H. F. da Silva (e-mail: [chomero@cemig.com.br](mailto:chomero@cemig.com.br)) trabalha na Cemig Geração e Transmissão SA.

fomente e incentivo a aquisição e fornecimento de peças nacionais, promovendo a abertura de novos horizontes para a indústria brasileira. Desta maneira o projeto engloba o ciclo completo de desenvolvimento do produto, desde o seu projeto, até a sua fabricação, tendo assim um caráter especialmente inovador e atrativo do ponto de vista tecnológico e industrial [2]. A Figura 1 mostra o Motor Stirling Solo de 9 kW e de 500 W montados nos laboratórios do NEST.



(a)



(b)

Figura 1 – Motores Stirling: 9 kW (a) e 500 W (b) montados no NEST.

### III. RESULTADOS OBTIDOS - P&D CEMIG/ANEEL 123 (CÓDIGO ANEEL 0049-069/2004)

O pastor escocês Robert Stirling em 1816, auxiliado pelo seu irmão engenheiro, aperfeiçoou um motor de combustão externa. Os irmãos Stirling buscaram conceber um mecanismo mais seguro que as caldeiras, que naquela época causava inúmeros acidentes, resultando em mutilações nos trabalhadores da indústria. É referido também como "motor de ar quente", por utilizar os gases atmosféricos como fluido de trabalho. Este tipo de motor funciona com um ciclo termodinâmico composto de 4 fases e executado em 2 tempos do pistão: compressão isotérmica, aquecimento isocórico, expansão isotérmica e resfriamento isocórico. A Figura 2 mostra o diagrama pressão versus temperatura. Este é o ciclo idealizado, que diverge do ciclo real medido por

instrumentos. Não obstante, encontra-se muito próximo do chamado Ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas.

O motor Stirling apresenta diversas vantagens: é pouco poluente pois a combustão é contínua, e não intermitente como nos motores Ciclo de Otto e Ciclo Diesel, permitindo uma queima mais completa e eficiente do combustível. Por isso é muito silencioso e apresenta baixa vibração, uma vez que não há explosão. É verdadeiramente multi-combustível, pode utilizar praticamente qualquer fonte energética: gasolina, etanol, metanol, gás natural, óleo diesel, biogás, GLP, energia solar, calor geotérmico e outros. Basta gerar uma diferença de temperatura significativa entre a câmara quente e a câmara fria para produzir trabalho. A eficiência neste caso, conforme indica a termodinâmica será maior quanto maior for a temperatura. A Figura 3 mostra um esquema de funcionamento deste motor.

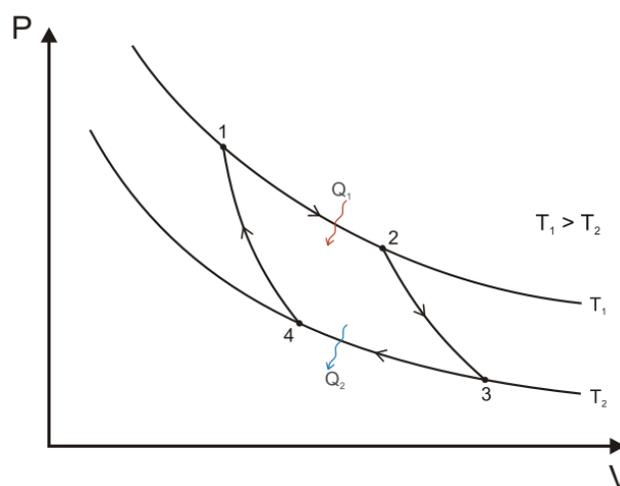


Figura 2 – Ciclo termodinâmico para o motor Stirling. [3]

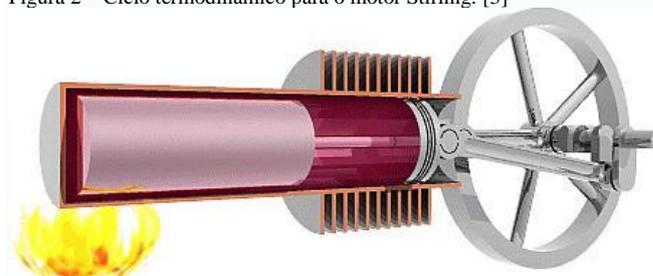


Figura 3 – Motor Stirling: esquema de funcionamento [3].

Há 3 configurações básicas de motor Stirling: Alfa - com cilindros em V; Beta - com êmbolos co-axiais num mesmo cilindro; Gama - com cilindros em linha.

Algumas atividades necessárias para se atingir os objetivos do projeto são descritas a seguir [4]:

- A modelagem do sistema, visando a definição das características do novo motor;
- Desenvolvimento, fabricação e testes de avaliação de três protótipos de 9 kW com sistema de combustão de biomassa associado;
- Projetar, construir e testar uma fornalha compacta para queima de biomassa;
- Avaliar a operação isolada, a viabilidade técnico-econômica e possibilidade de fabricação nacional.

Foram realizadas visitas a alguns fabricantes de motores Stirling na Dinamarca e na Áustria. Na Áustria existe um motor Stirling já adaptado para funcionamento com biomassa, na forma de *pellets*, desenvolvido pelo *Joanneum Research*. Este motor, pela simplicidade de adaptação, foi escolhido como modelo para o desenvolvimento do protótipo nacional através do P&D 123 (Código Aneel 0049-069/2004). Após diversos contatos, o pesquisador do *Joanneum Research*, Dr. Erich Podesser, passou a participar do projeto em uma colaboração bilateral. A Figura 4 mostra o motor austríaco, modelo para os desenvolvimentos do projeto e dos protótipo.



Figura 4 – Motor Stirling.

A metodologia adotada para execução deste projeto pode ser resumida nas etapas mostradas a seguir [2]:

- Estudo para definição do fluido de trabalho de gás hélio, ar ou nitrogênio, considerando a facilidade de obtenção e custo do fluido de trabalho;
- Redução da pressão de operação, até limites que garantiriam a segurança de operação;
- Desenvolvimento de um sistema de controle de frequência e carga que permitisse a operação de forma independente da rede;
- Redução da resistência hidráulica no sistema de resfriamento até valores compatíveis com a carga fornecida pelo sistema de fornecimento de água acionado com vapor da fornalha, através de um ejetor de vapor.

De todos os motores estudados definiu-se pelo motor Alfa em relação às outras configurações. Por este critério foi selecionado um mecanismo de motor alternativo com dos pistões defasados a 90°. Este mecanismo corresponde a uma motocicleta Cagiva. Vários fluidos de trabalho podem ser utilizados em motores Stirling. Na Figura 5 apresenta uma comparação numérica dos diferentes fluidos de trabalho.

Esta figura resume um estudo extensivo utilizando métodos de otimização. Os resultados são referentes a um motor Stirling de 165 kW por cilindro, temperatura do trocador de calor de aquecimento de 700°C, temperatura do trocador de

calor de resfriamento de 25°C e uma pressão máxima do gás de trabalho de 110kgf/cm<sup>2</sup>. A eficiência total do motor é função da potência de saída por unidade de deslocamento. O tamanho do motor diminui para o lado direito da curva. As três curvas correspondem aos três diferentes gases de trabalho, gerando a mesma potencia em qualquer ponto com a máxima eficiência possível.

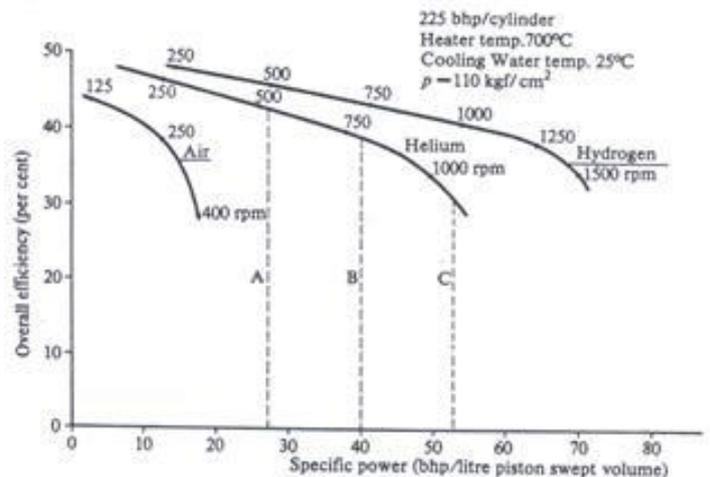


Figura 5 – Desempenho do motor Stirling com diferentes fluidos de trabalho [5].

Isto sugere que em baixas potências, e baixas rotações, não há vantagens substanciais na substituição do ar por Hélio ou hidrogênio.

O fluido de trabalho adotado para este protótipo foi o nitrogênio, devido às vantagens citadas abaixo:

- Barato e disponível;
- Alguns pequenos vazamentos são toleráveis e os selos são mais baratos;
- Podem-se compensar os vazamentos com um compressor auxiliar.

Nas Figuras 6-7 é apresentada a simulação para a potência do motor em função do ângulo de defasagem. A Figura 8 mostra a potência produzida pelo motor Stirling em função do volume de deslocamento a diferentes pressões de operação. Pode-se observar que existe um ponto ótimo que relaciona o volume do pistão quente e o volume de fluido de trabalho deslocado. Pode-se dizer que a relação ótima entre é aproximadamente 2, mas, considerando as perdas por fricção no trocador de calor e no regenerador, este valor deve aumentar [6].

A Figura 9 mostra a influencia da temperatura sobre a potência produzida para diferentes pressões de operação. A importância de uma boa seleção dos parâmetros de operação como temperatura e pressão e do cálculo apurado dos volumes do motor possui reflexos construtivos e de desempenho do motor [7].

A Figura 10 mostra como o conjunto motor Stirling/Gerador pode ser integrado no sistema de combustão de biomassa. Também é importante definir como a biomassa vai ser fornecida no sistema, seja madeira ou algum outro tipo de resíduo. Este sistema pode ser automático, manual ou ambos.

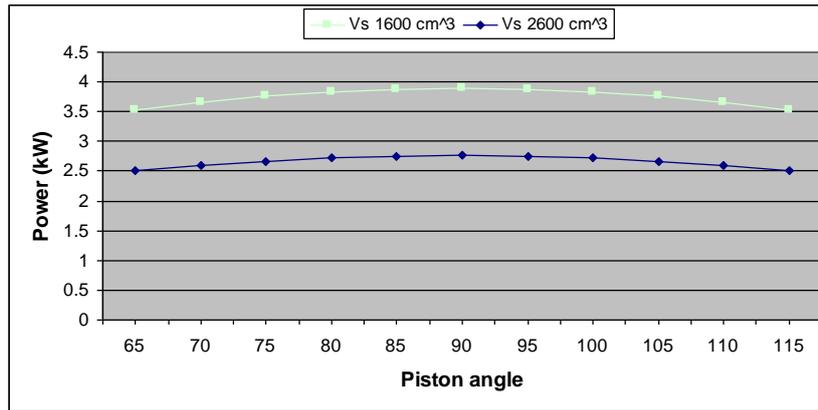


Figura 6 – Potência em função do ângulo de defasagem entre os pistões quente e frio [6].

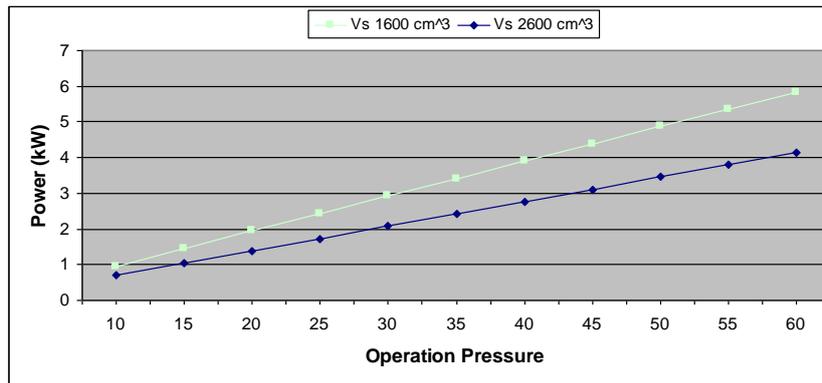


Figura 7 – Potência em função de diferentes volumes de deslocamento para diferentes pressões de operação [6].

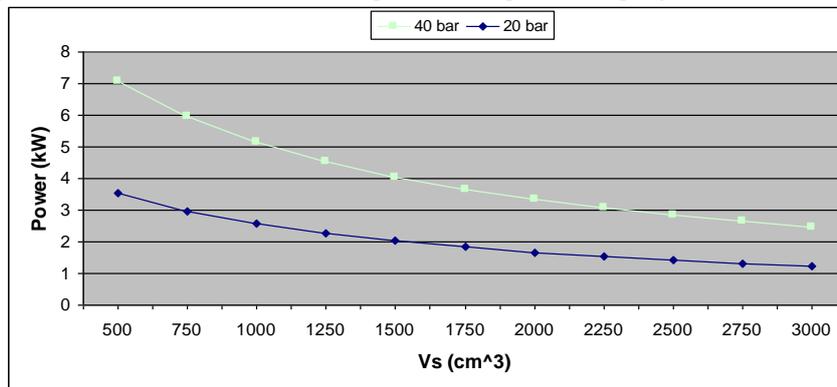


Figura 8 – Potência em função do volume deslocado [6].

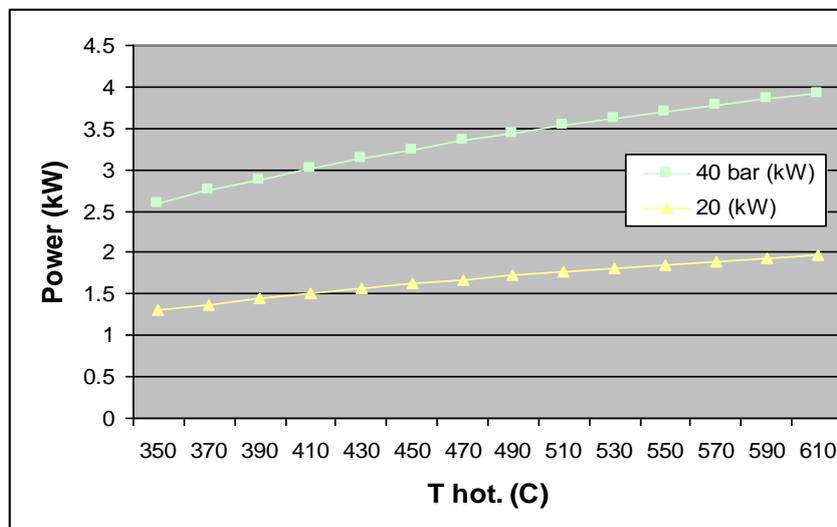


Figura 9 – Relação entre a potência produzida e a temperatura de operação [6].

O ar do ambiente deve passar primeiramente por um trocador de calor onde será pré-aquecido entre 300 a 600 °C. Este ar pré-aquecido é fornecido posteriormente na câmara de combustão onde se pode ter dois estágios de combustão: primário e secundário. A temperatura final do gás depende da porcentagem de oxigênio envolvida no processo de combustão e da umidade da biomassa utilizada. O gás de combustão sai da câmara de combustão com uma temperatura entre 800 a 1200° C e entra em contato com o aquecedor do motor Stirling.

No ponto de projeto o gás quente entra em contato com o trocador de calor quente a 1000 °C e deixa este aproximadamente a 750 °C. A chaminé depois do trocador de calor para preaquecimento do ar.

O diagrama de Sankey da Figura 11 mostra os fluxos de energia envolvidos no processo de acoplamento do motor Stirling à fornalha. Através deste diagrama se pode observar a importância do processo de recuperação da temperatura dos gases de exaustão no pré-aquecimento do ar [9]

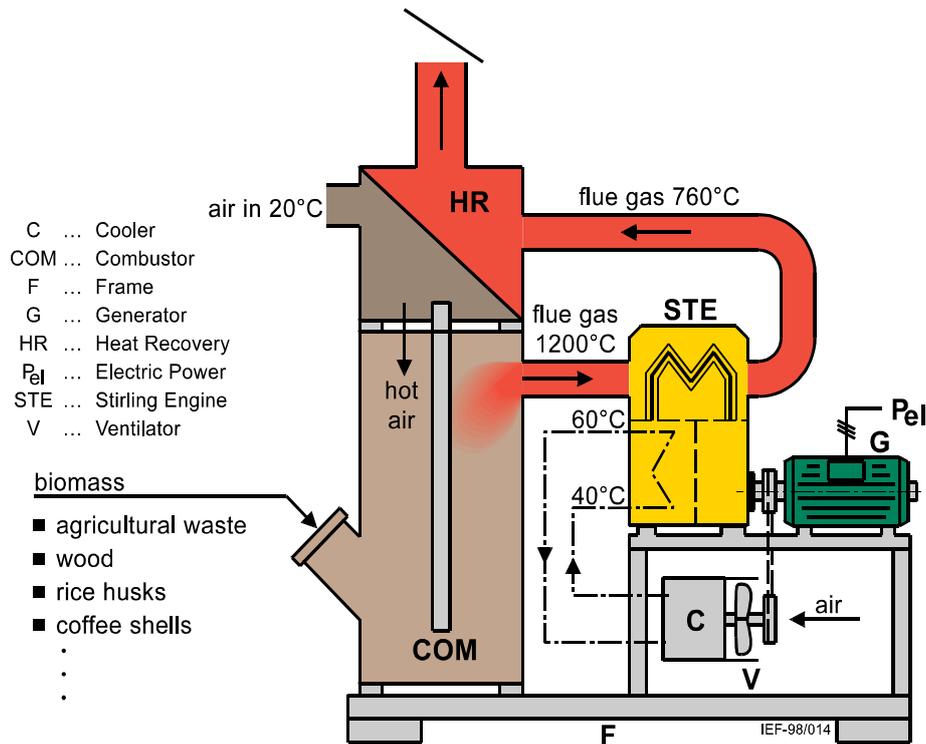


Figura 10 - Integração do motor Stirling numa fornalha para biomassa [8]

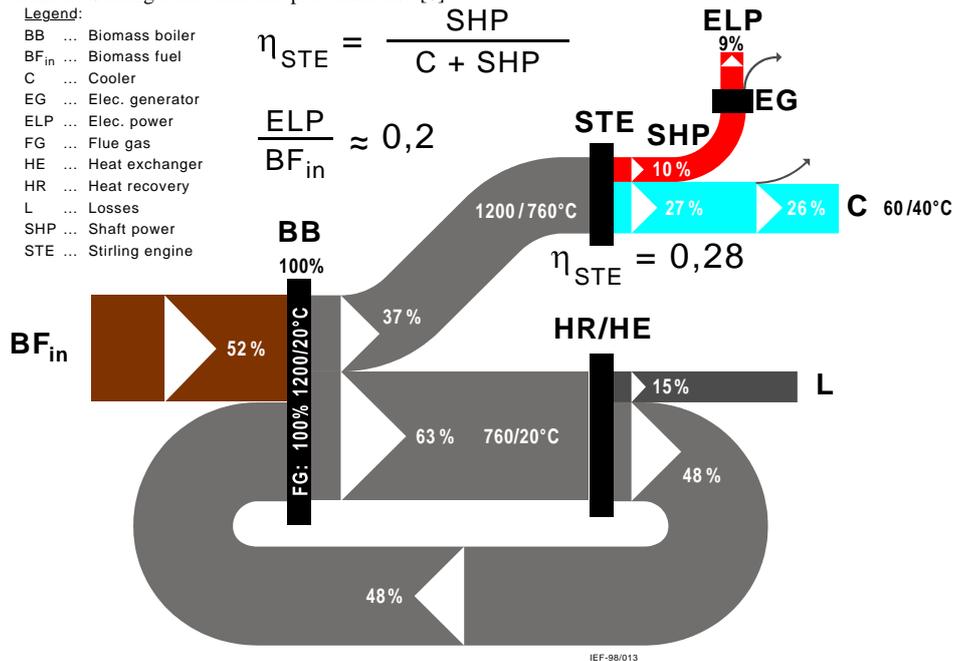


Figura 11 - Diagrama de SANKEY do acoplamento da fornalha a biomassa acoplada ao sistema Motor Stirling/Gerador elétrico [9].

Apenas 37% da energia térmica é fornecida ao aquecedor do motor Stirling e, resultante da troca térmica. Os 63% restantes do conteúdo energético inicial no gás de combustão entra no trocador de calor onde aquece o ar de combustão. Neste pré-aquecedor se recupera 48 % do calor deste gás, transferindo este a o ar, o qual se aquece até aproximadamente 580 °C. Depois do pré-aquecedor o gás de exaustão se esfria até 176 °C e é liberado ao ambiente. A recuperação do 48% leva a uma redução de 48% no fornecimento de biomassa. Desta maneira, 100 % da capacidade térmica do gás produzido é fornecida com 52 % de biomassa e os outros 48 % pelo sistema de recuperação. Conseqüentemente, a relação entre a potência de eixo entregue pelo Stirling e aumentada de 10 para aproximadamente 20 %.

O sistema motor Stirling acoplado à fornalha de biomassa foi testado de forma preliminar encontrando-se algumas dificuldades ao longo dos testes. Na figura 12 se mostra o sistema acoplado para os testes preliminares.



Figura 12 – Fornalha Motor Stirling acoplados.

Uma das decisões tomadas para estes testes foi a não utilização de um ventilador para forçar o fluxo do gás produto da combustão. Foi utilizado um sistema de ejetor que garante uma tiragem intermediária do fluxo de gases quentes, permitindo avaliar o sistema do ponto de vista mecânico é não energético. Ou seja, a potência obtida é menor assim como a velocidade do motor.

A avaliação do motor deste ponto de vista é importante porque permite detectar outros problemas que poderiam afetar o motor mais severamente no caso de este se encontrar operando com um fluxo de gases quentes maior, e uma maior velocidade, o que seria garantido pela tiragem com um ventilador forçado. O principal problema encontrado foi à danificação do sistema de transmissão de movimento (pistão haste) entre o virabrequim e o pistão quente do Stirling. O que levou ao teste de diferentes alternativas para este sistema.

Outro problema ocorrido na fase de teste foi a quebra da haste de ligação entre o pistão do motor Stirling e o pistão Ducatti. A causa deste problema foi o ajuste adotado entre o pistão quente e o topo do cilindro quente do Stirling. Após alguns minutos de operação com temperaturas da ordem de

950°C no topo houve a dilatação da parte superior do pistão e o topo do cilindro entrando em contacto entre ambos. Isto provocou a quebra da haste de transmissão e o do pistão Ducatti que é fabricado de alumínio. Após este problema decidiu-se fabricar uma peça mais robusta para substituir o pistão Ducatti danificado. Foi testado o sistema novamente, e detectado que a peça projetada apresentava uma fricção acentuada na descida do pistão quente fato devido a pouca área de apoio desta peça no cilindro e a distancia considerável entre os anéis guias da peça.

O motor Stirling pode operar no ciclo inverso como um compressor, resultando em uma máquina de frio, podendo-se obter temperaturas muito baixas dependendo da pressão de operação. Por outro lado o aumento da pressão de trabalho requer de um acionador potente, mas como a intenção do teste foi só verificar a operação do motor. Foram obtidas temperaturas de -10°C com uma pressão de nitrogênio de 1177 kPa a apenas 10 minutos de operação. A Figura 13 apresenta o congelamento no pistão durante esta operação.



Fig. 13 – Motor Stirling operando em ciclo inverso.

Após os testes de operação com o motor Stirling em ciclo inverso foi constatada a necessidade de compatibilidade entre os materiais do pistão e do cilindro Ducatti. Isto se deve a que a fricção entre alumínio (material do cilindro Ducatti) e aço (material do pistão fabricado) é muito elevada levando à danificação do metal do cilindro.

Dos testes realizados obtiveram alguns resultados preliminares os quais são mostrados na Tabela 1. A Figura 14 apresenta o sistema operando, pode-se observar a cor da cobertura do trocador de calor quente submetido às elevadas temperaturas de operação. A Figura 15 apresenta a montagem do motor para o teste.

Foram realizadas medições com duas pressões de fornecimento de nitrogênio para valores similares de temperatura na entrada do trocador de calor quente. É importante assinalar que o consumo de biomassa relativamente elevado se deve às ausências do sistema de pré-aquecimento do ar da fornalha e do sistema de tiro forçado com ventilador.

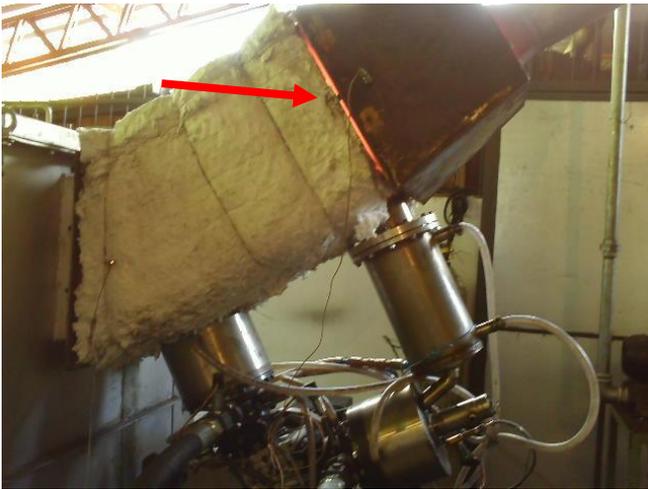


Fig. 14 – Sistema operando a 900°C de temperatura na entrada do trocador de calor quente.



Fig. 15 – Motor Stirling em teste.

TABELA 1  
PRINCIPAIS VALORES OBTIDOS NO TESTE DO MOTOR STIRLING  
OPERANDO COM BIOMASSA [10].

Parâmetro	Nitrogênio	
Gás de trabalho	Nitrogênio	
Pressão fornecida	1470 kPa	2451 kPa
Pressão máxima no topo do pistão de compressão	1765 kPa	2843 kPa
Pressão máxima na parte inferior do pistão quente	1667 kPa	2549 kPa
Velocidade de operação	300 rpm	300 rpm
Potência elétrica gerada	0,7 kW	0,9 kW
Temperatura ambiente	32°C	32°C
Temperatura na entrada do trocador frio	22°C	22°C
Temperatura na saída do trocador frio	50°C	52°C
Temperatura na entrada do trocador de calor quente	900°C	890°C
Temperatura na saída do trocador quente	750°C	760°C
Consumo de biomassa	70 kg/h	70 kg/h

Alguns problemas apresentados durante a realização do projeto:

- Baixa velocidade de operação do motor: A velocidade de rotação nominal esperada deve ser 600 rpm mas, só conseguiu 300 rpm. A potência do motor depende da velocidade de rotação ótima; baixas velocidades representam baixas potências e eficiência. Esta baixa rotação pode ser provocada por várias razões, como por exemplo: transferência de calor insuficiente no trocador quente do motor; volume morto excessivo; perdas mecânicas e por fricção do fluido de trabalho no interior do motor. A primeira instalação do sistema foi feita assumindo que uma chaminé de aproximadamente 10 m de altura seria suficiente para garantir a velocidade dos gases quentes através do trocador de calor quente. A velocidade dos gases se dá pela diferença de densidade dos gases de combustão na chaminé e o ar ambiente à pressão atmosférica. Para aumentar esta velocidade foi colocado um ejetor. Na prática constatou-se que a velocidade dos gases obtida não foi suficiente, mantendo o motor a baixa velocidade. Como os gases quentes saem a temperaturas acima de 500°C é inviável medir o fluxo destes com um medidor de vazão convencional. Para resolver este problema foi instalado um ventilador de tiro forçado para os gases, como é feito em caldeiras convencionais que, se servem deste mecanismo para vencer as perdas de carga através dos tubos dos trocadores de calor. Aproveitando a tiragem forçada foi instalado também um sistema de pré-aquecimento do ar de combustão. Antes de passar pelo ventilador de tiro forçado, os gases de combustão são esfriados num trocador de calor de pré-aquecimento do ar, desta forma a eficiência da fornalha pode ser aumentada consideravelmente. Depois de testado este sistema observou-se que o problema da baixa rotação continua. Conclui-se que o problema da transferência de calor insuficiente não é produto da baixa velocidade dos gases quentes no exterior do trocador quente e sim um problema interno do motor.
- Problema com relação às forças aplicadas na peça de transmissão de movimento. Neste primeiro protótipo, por questão de custos, decidiu-se usar um bloco de motocicleta como mecanismo de transmissão de movimento e, na cabeça do pistão da moto, é acoplado o pistão do motor Stirling. Ao selecionar este mecanismo só foram consideradas as forças pelo efeito da expansão no pistão do Stirling (força na direção descendente), que são menores que as forças às que está submetido o pistão da moto selecionada quando operando como motor convencional. Na realidade, existe outra força produto à mudança de movimento alternativo (sobe e desce), do pistão Stirling acoplado sobre o pistão da moto. Esta outra força faz que os parafusos (de aço) que fixam o pistão do Stirling na cabeça do pistão da moto (de alumínio) fadiguem a este último provocando ruptura num período curto de operação. Foi projetada e fabricada uma nova peça de transmissão de movimento em aço a qual é muito mais resistente. Esta peça é fabricada em aço e a superfície da haste foi cromada para garantir o mínimo desgaste possível ao friccionar com o selo que trabalha sobre esta;

- Incompatibilidade de materiais usados no projeto. Desgaste das superfícies submetidas à fricção com o material dos selos. Após poucas horas de operação notou-se o aparecimento de um pó preto no interior do motor devido à fricção do aço inox com o material do selo. Este problema foi resolvido trocando o aço da haste por um aço mais duro, e conseqüentemente mais barato e colocando uma camada de cromo na sua superfície. Na região da haste do *crosshead* a temperatura é menor de 250°C pelo que não é necessário um aço altamente resistente a temperatura e esta região é lubrificada. No caso dos cilindros do Motor Stirling, onde a temperatura é maior, foi aplicada uma camada de cromo duro a qual deve ser suficiente.

A Figura 16 mostra as peças fabricadas para os outros dois protótipos previstos para a construção neste projeto. Estas peças não sofrem interferência dos problemas citados, compondo outras partes necessárias do sistema.



Fig. 16 – Peças para mais dois protótipos do motor Stirling.

#### IV. CONCLUSÕES

Este projeto possibilitou a capacitação de mão-de-obra, pelo envolvimento de pesquisadores nacionais e internacionais, bolsistas e professores. Houve o fortalecimento do centro de excelência em sistemas térmicos (NEST/UNIFEI) pelo mapeamento da tecnologia motor Stirling. Para a Cemig

D os resultados deste projeto forneceram subsídios de forma a identificar oportunidade no aproveitamento energético da biomassa, no uso de sistemas de energia com motores Stirling e no encaminhamento de ações e políticas associadas a geração distribuída. Indiretamente os resultados do trabalho de pesquisa do P&D Cemig Aneel nº 123 (Código Aneel 0049-069/2004) promovem o fomento para a indústria nacional, na medida em que cria condições técnicas para nacionalização e desenvolvimento deste tipo de motor.

A utilização da biomassa é alternativa viável correta e importante para o atendimento, a um menor custo, do crescimento da demanda energética da sociedade, para geração de emprego e renda de forma descentralizada. Um protótipo nacional de motor Stirling tipo alfa de 9 kW acoplado à fornalha de biomassa de 50 kW encontra-se em fase final de testes e ajustes, estando em funcionamento nos laboratórios do NEST. Outros dois protótipos estão sendo desenvolvidos, já considerando a incorporação das melhorias ocorridas no primeiro protótipo. O desenvolvimento de um bloco de motor nacional, sem caixa de marchas, em substituição ao bloco do motor Ducatti também está sendo estudado, para dar maior rigidez e simplicidade ao motor Stirling nacional.

Os estudos sofreram as dificuldades, em certa medida inerentes aos processos reais e experimentais. Tais problemas encontram-se principalmente relacionados a materiais construtivos levando-se em consideração a exigência das condições de operação.

Os resultados obtidos neste projeto encontram-se arquivados na Gerencia de Alternativa Energética da Cemig e o teor dos documentos reforça a convicção de que se trata de uma tecnologia que contribuirá de forma relevante e significativa para a segurança energética e com menores impactos ambientais.

#### V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições da equipe de trabalho do projeto de Sistema de Geração de Energia Elétrica com Motor Stirling da NEST/UNIFEI/Itajubá/MG coordenada pelo Prof. Dr. Electo Silva Lora e pelo Prof. Dr. Vladimir R. M. Cobas.

#### VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lora, E.E.S., A. M. Carvalho, "P&D123 – Sistema de Geração de Energia com Motor Stirling", Projeto Cemig/Aneel Ciclo 2003/2004.
- [2] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 1ª etapa, UNIFEI, 2006.
- [3] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor\\_Stirling](http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling) , acessado em 08/03/2010 às 14:56 h.
- [4] Carvalho, A. M., Silva, C. H. F., Lora, E. E. S., Nascimento, M. A. R., Venturini, O.J., Andrade, R.V., Cobas, V.R.M., Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída, IV CITENEL, Araxá, 2007.
- [5] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 2ª etapa, UNIFEI, 2007.
- [6] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 3ª etapa, UNIFEI, 2007.
- [7] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 4ª etapa, UNIFEI, 2007.
- [8] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 5ª etapa, UNIFEI, 2008.
- [9] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório parcial 6ª etapa, UNIFEI, 2008.
- [10] NEST Sistema de geração de energia com motor Stirling, Relatório final, UNIFEI, 2009.