

GERAÇÃO DE ENERGIA E A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA¹

Power Generation and Biomass Gasification

Electo Eduardo Silva Lora² e Rubenildo Vieira Andrade²

Resumo: O objetivo deste trabalho foi apresentar as diferentes tecnologias de gaseificação de biomassa, discutindo suas vantagens, desvantagens e aplicações, bem como mostrar algumas experiências bem-sucedidas nessa área. O trabalho apresenta ainda uma análise da utilização do gás de biomassa em motores de combustão interna alternativos e em novas tecnologias de geração distribuída, como motores Stirling e microturbinas a gás.

Palavras-chave: Gaseificadores, biomassa, motores de combustão interna e motores Stirling.

Abstract: This paper presents a review on biomass gasification technology discussing its advantages, disadvantages and applications as well as showing some successful experiences in this area. An analysis of the use of biomass gas in alternative engines and new distributed generation technology, such as stirling engines and microturbines, is also presented.

Key words: Gasifiers, biomass, spark engines and Stirling engines.

1 INTRODUÇÃO

O potencial energético da biomassa é enorme, tanto em escala mundial como no Brasil. Ao mesmo tempo, os biocombustíveis poderiam ser uma das soluções para o fornecimento de eletricidade em comunidades isoladas, o que simultaneamente pode constituir um incentivo para o desenvolvimento de atividades extrativistas sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento destas comunidades.

Um aspecto importante a analisar é a tecnologia de conversão a ser utilizada. Neste sentido, a gaseificação apresenta alguns

aspectos interessantes e algumas vantagens. Porém, não deve ser considerada uma panacéia, devendo ser internalizadas as lições de fracassos relacionados com programas de eletrificação no meio rural baseados nesta tecnologia de conversão.

Deve-se abordar o problema tecnológico de maneira integrada, junto com os aspectos sociais, culturais e ambientais, com ênfase na aceitação da tecnologia pela comunidade, no treinamento do pessoal que irá operar o sistema e na sustentabilidade de todo o processo. Outras tecnologias poderiam ser utilizadas em casos específicos, como a combustão da biomassa acoplada a ciclos a vapor e a

¹ Recebido para publicação em 23.7.2004 e aceito em 28.8.2004.

² Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Caixa Postal 50,0 NEST 37500-903 Itajubá-MG, <electo@unifei.edu.br>, <ruben@unifei.edu.br>.

motores Stirling e o uso do biodiesel em motores de combustão interna. Porém, não é fácil a tomada de decisões neste sentido, considerando o insuficiente desenvolvimento, as poucas opções comerciais e a complexidade e baixa confiabilidade da maioria destas tecnologias.

O objetivo deste trabalho foi a abordagem do estado da arte das tecnologias de geração de eletricidade baseadas na gaseificação de biomassa, visando a sua utilização em programas de eletrificação de regiões isoladas.

2 A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA:

FUNDAMENTOS, APLICAÇÕES E BARREIRAS TECNOLÓGICAS

Gaseificação é a conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas. Este gás é conhecido como gás pobre ou *producer gas*. O conteúdo médio dos compostos combustíveis no gás resultante da biomassa é para o CO entre 15 e 30%, para o H₂ entre 12 e 40% e para o CH₄ entre 4,5 e 9%. O poder calorífico do gás fica na faixa entre 4 e 13 MJ m⁻³. Os menores valores correspondem à gaseificação com ar e os maiores, à gaseificação com adição de vapor de água ou oxigênio.

A gaseificação, embora tecnologicamente mais complicada, apresenta algumas vantagens em comparação com a combustão direta.

A geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo de vapor, utilizando o gás da biomassa diretamente em um motor de combustão interna ou, em perspectiva, em um motor Stirling, microturbina a gás ou célula combustível. Deve-se destacar que é possível obter eficiências comparáveis com as de centrais térmicas a carvão, fato este que constitui uma quebra de paradigmas.

Os gaseificadores para biomassa podem ser classificados de acordo com os seguintes parâmetros:

a) Poder calorífico do gás produzido:

- Gás de baixo poder calorífico - até 5 MJ Nm⁻³.
- Gás de médio poder calorífico - de 5 a 10 MJ Nm⁻³.
- Gás de alto poder calorífico - de 10 a 40 MJ Nm⁻³.

O poder calorífico do gás influi significativamente sobre a sua possível aplicação, como indicado na Figura 1.

b) Tipo de agente de gaseificação:

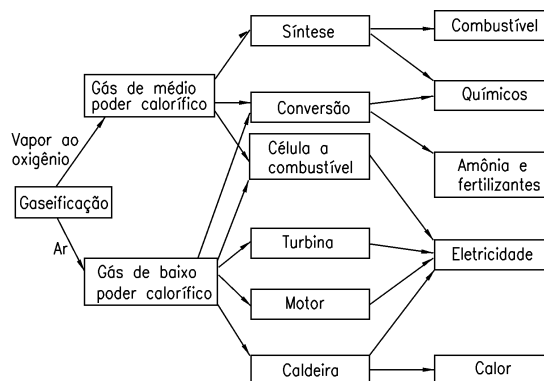
- Ar.
- Vapor de água.
- Oxigênio.

c) Pressão de trabalho:

- Baixa pressão (atmosférica).
- Pressurizados (até 3 MPa).

d) Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação (Figura 2):

- Leito em movimento a contrafluxo com o gás (contracorrente).



Fonte: Bridgwater (2003).

Figura 1 – Aplicações da gaseificação de biomassa em dependência do poder calorífico do gás.

Figure 1 – Biomass gasification application according to calorific value.

- Leito em movimento a fluxo direto com o gás (concorrente).
- Leito em movimento perpendicular ao fluxo de gás (fluxo cruzado).
- Leito fluidizado.

Na Figura 3 apresenta-se uma avaliação em relação ao grau de desenvolvimento tecnológico e à atratividade dos diferentes tipos de gaseificadores para biomassa. Os gaseificadores de leito fluidizado e os concorrentes são os que se encontram em melhor posição para implementação comercial em grande escala.

O gás produto da gaseificação da biomassa contém contaminantes, tais como partículas sólidas, alcatrão, metais alcalinos, sulfeto de hidrogênio e amônia, que devem ser removidos, pois podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos energéticos que utilizam este gás. A concentração de contaminantes varia de acordo com o tipo de gaseificador (Figura 4). No Quadro 1 estão os requerimentos para a qualidade do gás de gaseificação para diferentes aplicações.

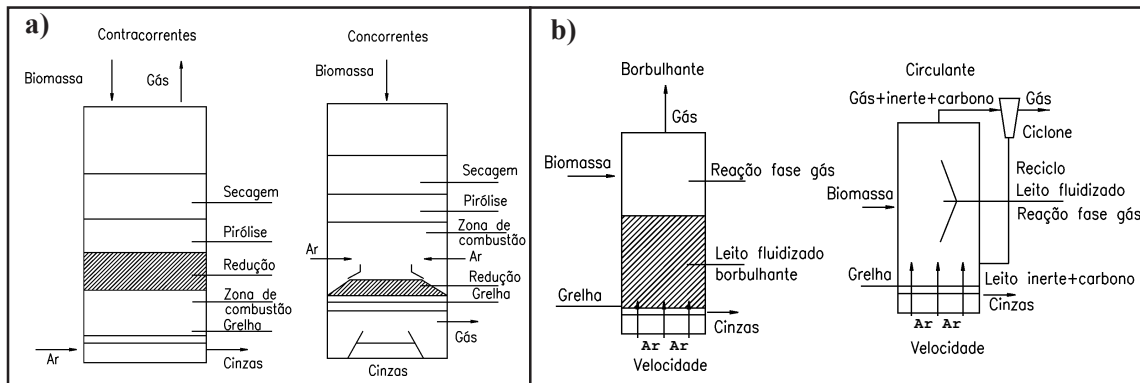


Figura 2 – Classificação dos gaseificadores atendendo à direção relativa de movimentação do gás e da biomassa (Belgiorno et al., 2002): a) gaseificadores de leito fixo e b) gaseificadores de leito fluidizado.
Figure 2 – Gasifier classification according to gas and biomass relative movement (Belgiorno et al., 2002): a) Fixed bed gasifiers, b) Fluidized bed gasifiers.

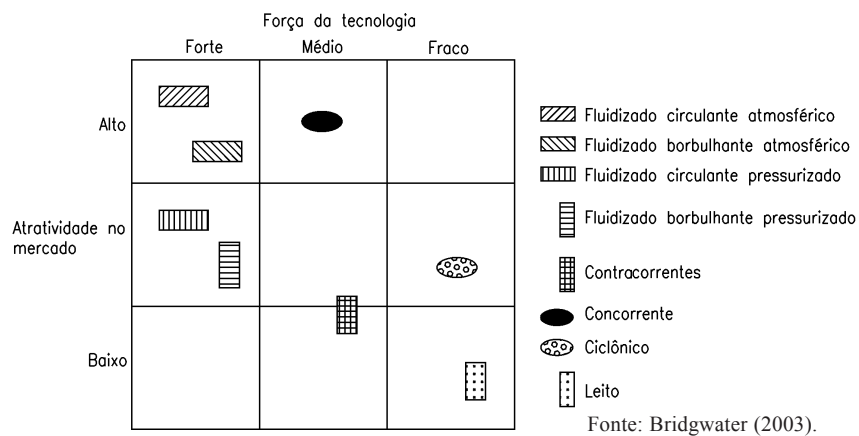
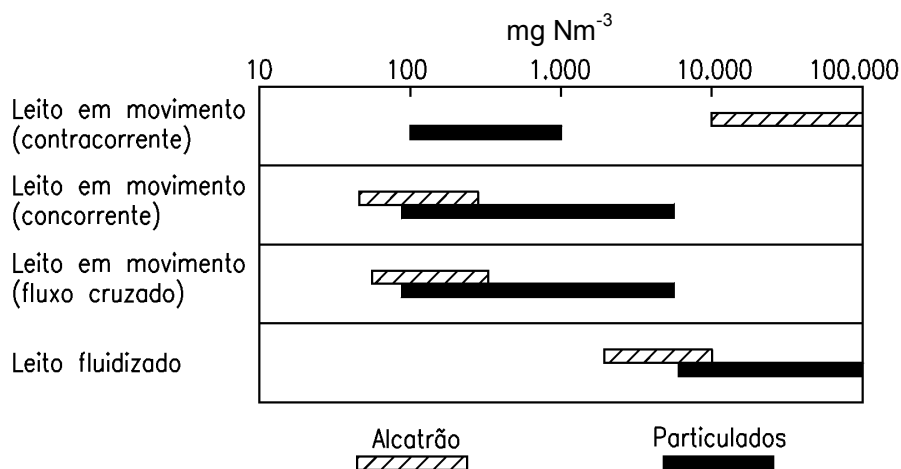


Figura 3 – Desenvolvimento tecnológico e atratividade dos diferentes tipos de gaseificadores.
Figure 3 – Technological development and attractivity of gasifier types.

Geralmente, considera-se que na faixa de potência de 100 kW_e a 2 MWe é mais viável produzir energia elétrica a partir de biomassa usando gaseificadores de leito em movimento e motores de combustão interna, principalmente do tipo concorrente, por causa do menor teor de alcatrão no gás. Gaseificadores de leito fluidizado são indicados para potências superiores a 3-5 MWe.

3 SISTEMA GASEIFICADOR/MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

A maioria dos projetos que envolvem geração de energia a partir de biomassa gaseificada de que se tem notícia utiliza motores de combustão interna alternativos (MCI). Os projetos envolvem tanto motores à gasolina, a gás como também a diesel. De



Fonte: Guigon & Large (1990).

Figura 4 – Faixa de variação do teor de alcatrão e particulados no gás obtido em diferentes tipos de gaseificadores.

Figure 4 – Percentage of tar and particulates in gas obtained from different types of gasifiers.

Quadro 1 – Requerimentos de qualidade do gás de gaseificação de biomassa para diferentes aplicações tecnológicas (Kaltschmitt & Hartmann, 2001)

Table 1 – Quality requirements of gas obtained from biomass gasification for different technological applications (Kaltschmitt & Hartmann, 2001)

Teor e Características dos Compostos e Controlados	Unidades	Motor de Combustão Interna	Turbina a Gás	Síntese de Metanol	Células a Combustível
Teor de particulados	mg Nm ⁻³	< 50	< 30	< 0,02	
Dimensões das partículas	m	< 3-10 ⁽¹⁾	< 5		
Teor de alcatrão	mg Nm ⁻³	< 100		< 0,1	< 1
Teor de álcalis (K, Na)	mg Nm ⁻³		< 0,25		
Teor de NH ₃	mg Nm ⁻³	< 55		< 0,1	< 0,1
Teor de H ₂ S	mg Nm ⁻³	< 1150		< 1	< 1

⁽¹⁾ Hassler & Nussbaumer (1999).

acordo com Knoef (2002), existem mais de 100 unidades de gaseificação de biomassa em pequena escala operando na Europa e nos Estados Unidos, além de algumas centenas nos países em desenvolvimento.

Quando se utiliza o gás de biomassa em motores à gasolina não é necessário fazer modificações nos mesmos, podendo funcionar somente com o gás. Neste caso, a razão de mistura gás-ar geralmente utilizada é de 1:1, podendo ela ser introduzida diretamente no carburador. Entretanto, os motores a diesel não conseguem operar somente com o gás de biomassa, podendo apenas substituir o diesel em até 90%, devendo-se realizar a partida com diesel e introduzir o gás de gaseificação gradativamente.

A potência e a eficiência dos motores durante a operação com gás de biomassa são menores que quando se utilizam os combustíveis de projeto. Portanto, para o caso de um motor diesel de 15 kWe a máxima eficiência obtida com a mistura foi de 14,71% e com diesel puro foi de 22,41%. Neste caso a potência máxima com a mistura foi de 12 kWe (Bhattacharya, 2001).

Um fator importante a considerar é o projeto do sistema de limpeza do gás, geralmente composto por várias etapas, que podem incluir: ciclone, resfriador, lavador, filtro de areia ou de papel etc.

Os seguintes projetos constituem exemplos de sucesso:

- O gaseificador de topo aberto, do *Indian Institute of Science*, que forma parte de uma planta-piloto de 100 kWe em operação. A eficiência do gaseificador é de aproximadamente 80% (Mukunda et al., 1993; Bulher, 1994). O poder calorífico do gás é de $4,7 \text{ MJ Nm}^{-3}$, e os teores de particulados e de alcatrão na saída do sistema de limpeza do gás são menores que 50 e 80 mg Nm^{-3} , respectivamente (Dassappa et al., 1996). A empresa Belga Xylowatt tem

implementado esta tecnologia em várias plantas de gaseificação na Europa (Gazel-150 kWe, Regal-300 MWe e Bulle-200 kWe).

- O gaseificador comercial chinês para casca de arroz, já vendido em escala comercial e com cerca de 100 unidades na China. O consumo específico de combustível em um gaseificador deste tipo, avaliado em Mali, foi de $3,75 - 4,0 \text{ kg casca kWh}^{-1}$, ainda que se reportem dados na faixa de $2,0 - 2,5 \text{ kg kWh}^{-1}$ para gaseificadores operando naquele país (Mahin, 1990).
- Gaseificador Enamora, instalado em Móra d'Ebre, Tarragona, Espanha, e projetado com apoio do Instituto Catalão de Energia. Trata-se de um gaseificador de cascas de nozes em leito fluidizado acoplado a um motor diesel com 750 kWe de potência. O sistema já acumula mais de 15.000 horas de operação. A eficiência do sistema é de 21-22% (EQTEC Ibéria, 2004).
- Planta de gaseificação em Gussing, Áustria. Composta por um gaseificador de leito fluidizado de duas zonas, que utiliza vapor como agente de gaseificação, e um motor a gás Jenbacher J620 GS. O poder calorífico do gás de gaseificação é 12 MJ Nm^{-3} e a eficiência elétrica do conjunto é de aproximadamente 30% (Elsebruch, 2003). A potência térmica fornecida para aquecimento distrital é de 4,5 MW e a potência elétrica, de 2 MW (Kaltschmitt, 2004)
- Biomax 15. Sistema gaseificador/MCI de 10-25 kWe desenvolvido pela empresa *Community Power Corporation* (CPC), conjuntamente com o *National Renewable Energy Laboratory-NREL* do Departamento de Energia dos Estados Unidos. O consumo específico de biomassa é de $1,5 \text{ kg kWh}^{-1}$ e o investimento específico, $1.200,00 \text{ \$ kWh}^{-1}$ (TMU, 2003).

- Gaseificador de fluxo cruzado da Termoquip.

Em 1983, o Banco Mundial iniciou o “Programa de monitoramento de gaseificadores de pequena escala para biomassa”. Os dados e as conclusões deste programa, obtidos em 1993, são (Stassen, 1995):

- O consumo específico médio de biomassa dos gaseificadores em operação é de 1,1 – 1,4 kg kWh⁻¹ naqueles que utilizam madeira, 0,9 kg kWh⁻¹ nos que utilizam carvão vegetal e 2,0 – 3,5 kg kWh⁻¹ quando o combustível é a casca de arroz.
- A eficiência média do sistema gaseificador – motor de combustão interna – é de 13%, um valor menor que o prometido pela maioria dos fabricantes.
- A fração de diesel substituída pelo gás é de 40 – 70%.
- O investimento específico em gaseificadores de fabricação nacional, nos países em desenvolvimento, é de

400 – 1.550 US\$ kWe⁻¹, e em gaseificadores importados de 850 a 4.200 US\$ kWe⁻¹.

- Os gaseificadores de biomassa para geração de potência, em geral, não são uma opção economicamente atrativa para preços do petróleo, na faixa de 15 a 20 US\$ por barril.

As principais causas de fracassos e êxitos em programas de gaseificação de biomassa em pequena escala, segundo Stassen (1995) e Knoef (2002), estão apresentadas no Quadro 2.

4 SISTEMA GASEIFICADOR/MOTOR STIRLING

O Stirling é um motor de combustão externa, o que faz com que, em princípio, seja possível utilizar nele qualquer tipo de combustível. A biomassa, tanto através da sua combustão direta, como através da gaseificação, é um combustível muito perspectivo para os motores Stirling, pois sendo estes de fácil operação e construídos em forma de

Quadro 2 – Causas de fracassos e êxitos em programas de gaseificação em pequena escala
Table 2 – Reasons for failures and successes in small-scale gasification programs

Razões	Fracassos	Êxitos
Técnicas	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldades operacionais por problemas técnicos de projeto (fusão de cinzas, baixo poder calorífico do gás, baixa confiabilidade). - Pouca experiência dos operadores. - Ajuste inadequado de capacidade no sistema gaseificador - motor. - Alto valor das emissões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Operadores bem preparados e motivados. - Apoio técnico constante. - Protótipos testados durante longo tempo. - Capacidade de fabricação local.
Financeiras	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo dos gaseificadores importados. - Investimentos privados limitados. - Aumento dos preços da biomassa. - Remuneração da energia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnologia bem desenvolvida. - Disponibilidade de peças de reposição. - Contrato a longo prazo para a comercialização da eletricidade.
Institucionais	<ul style="list-style-type: none"> - Apoio insuficiente. - Instalação dos gaseificadores em lugares inadequados sem interesse comercial. - Desconhecimento da tecnologia pelas autoridades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apoio intenso. - Presença de equipe experiente em gaseificação para treinamento e manutenção.

unidades seladas podem ser instalados em regiões isoladas. A maior desvantagem deste tipo de motor é o seu alto custo.

Já existem modelos comerciais, numa faixa de potências de 9-70 kWe, para a operação com gás natural e GLP. No futuro espera-se atingir capacidades de até 300 kWe. Um dos projetos mais bem-sucedidos é o da Universidade Técnica de Dinamarca, onde foi desenvolvido e testado por longo tempo um motor Stirling que opera acoplado a um gaseificador de biomassa (Carlsen, 2002). Um gaseificador contracorrente da Backcock & Wilcox foi anexado a um motor Stirling de 35 kWel, fabricado na própria Universidade. A eficiência líquida do sistema foi de 13,9%.

Em comparação com sistemas que utilizam fornalhas para biomassa, este conjunto motor Stirling-gaseificador de biomassa tem as seguintes vantagens:

- Não foram observados consideráveis depósitos de cinzas nos tubos do aquecedor, o que faz com que não seja necessária a limpeza do gás.
- O fato de o gás ser queimado à alta temperatura em uma câmara de combustão faz com que o teor de alcatrão e a sua remoção deixem de ser um problema.
- É conveniente a geração do gás à alta temperatura.

5 A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA E OS SISTEMAS AVANÇADOS DE GERAÇÃO (MICROTURBINAS E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL)

Em princípio, é possível utilizar o gás obtido como resultado da gaseificação da biomassa para acionar microturbinas a gás e células a combustível. Estas opções têm como vantagens uma alta eficiência de conversão, a possibilidade de operar em regime de co-geração e um impacto ambiental muito pequeno. Porém, encontram-se atualmente nas

etapas iniciais de desenvolvimento. Vejamos, na continuação, os projetos de pesquisa em andamento:

a) Sistema Gaseificador de Biomassa/Microturbina

- Nos Estados Unidos a empresa *Reflective Energies* está desenvolvendo o projeto denominado Flex-microturbine, que consiste no remodelamento de uma microturbina da *Capstone Corporation* para a queima catalítica de gás pobre. Em 2003 foi fabricado o primeiro protótipo, e um projeto demonstrativo com a gaseificação de cascas de nozes e a Flex-microturbine está sendo implementado em Tucson, Arizona (DOE, 2002).
- A CSIRO- *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*, a JC Smale & Co e a Capstone estão desenvolvendo o projeto *Green Gasifier Generator*, que prevê o acoplamento de um gaseificador de biomassa a uma microturbina da Capstone, a fim de criar sistemas com potência na faixa de 25-200 kW. O consumo específico de biomassa previsto é de aproximadamente 1 kg kWh⁻¹. Para o ano 2010, espera-se ter 1.000 unidades deste tipo em operação.

b) Sistema Gaseificador de Biomassa/Célula a Combustível.

As células de alta temperatura MCFC de carbonato fundido e SOFC de óxido sólido são as que apresentam melhores condições para seu acoplamento com gaseificadores de biomassa, microturbinas a gás e, ou, turbinas a vapor. Isto é consequência do nível térmico dos gases de exaustão da célula e da possibilidade de utilizar o CO presente no gás pobre como combustível. Não existem sistemas comerciais que utilizam biocombustíveis em células a combustível, e as pesquisas se

limitam à modelagem e otimização de diferentes variantes esquemáticas e a testes de curta duração em laboratórios.

5.1 Modelagem de sistemas

- Gaseificador de biomassa/células tipo MCFC tem sido estudado por Lobachyov & Richter (1998) e Kivisaari et al. (2002), mostrando como resultado eficiências de 53% para um sistema gaseificador/MCFC/turbina a vapor e de 32-43,5% para diferentes variantes de acoplamento de um gaseificador de biomassa e uma célula MCFC.
- Sistema gaseificador/microturbina/célula SOFC. Buhre & Andries (2000), para o caso de uma microturbina a gás de 28 kWe, obtiveram uma eficiência de 54,4%, devendo-se ressaltar que dois terços da potência elétrica total correspondem à célula a combustível.
- Na Universidade de Lund tem-se trabalhado na modelagem de um sistema gaseificador/microturbina/célula SOFC com uma potência de 4-5 MWe. Os resultados indicam a possibilidade de atingir uma eficiência na faixa de 55-58%. (Barchewitz & Parlsson, 2000).

5.2 Testes laboratoriais

- O Centro Holandês de Pesquisas em Energia-ECN – reportou os resultados da demonstração do acoplamento de uma célula tipo SOFC com um gaseificador de biomassa, demonstrando a factibilidade de operação do sistema e atingindo uma eficiência de 38-42,5%. A duração do teste foi de 48 horas (ECN, 2002).
- A Universidade de L'Alquila, na Itália, coordena o projeto “*Progress in coupling biomass gasification and MCFC stack*” da Comunidade Econômica Européia, que prevê a avaliação de um sistema integrado gaseificador de biomassa/MCFC de 500 kW de potência térmica e 125 KW de potência

elétrica. Está prevista a separação a quente das partículas, do cloro e do enxofre contido no gás. Atualmente a planta está em processo de montagem (Energy from biomass, 2000).

- Neste ano está prevista, no *National Renewable Energy Laboratory*, a realização de testes de um conjunto gaseificador/SOFC.
- A seção de Engenharia Térmica da Universidade de Delft, na Holanda, deve iniciar o projeto Biocellus, que pretende pesquisar o impacto de diferentes contaminantes presentes no gás de gaseificação sobre a operação da célula e o desenvolvimento e a demonstração de um sistema integrado gaseificador/SOFC específico para operação com biocombustíveis (Andries et al., 2003).

6 PROJETOS EM ANDAMENTO NO NÚCLEO DE EXCELÊNCIA EM GERAÇÃO TERMELÉTRICA E DISTRIBUÍDA – NEST DA UNIFEI

O Nest-UNIFEI, com recursos de projetos CTNERG e projetos P&D da ANEEL, em conjunto com a CEMIG e CPFL, desenvolve projetos de pesquisa nos seguintes temas relacionados com a geração de eletricidade a partir da gaseificação da biomassa:

- Projeto, montagem e teste de um sistema gaseificador/MCI de 10 kW de potência. Pretende-se utilizar um motor à gasolina.
- Avaliação experimental da operação de uma microturbina de 30 kWe, operando com misturas gás de gaseificação de biomassa/gás natural e com biodiesel.
- Avaliação de motores Stirling acoplados a um gaseificador de biomassa e uma fornalha, visando definir os parâmetros de operação, vantagens e desvantagens destes sistemas.

Quadro 3 – Indicadores e disponibilidade comercial das tecnologias para geração de eletricidade a partir da gaseificação da biomassa

Table 3 – Commercial indicators and availability of technologies for power generation from biomass gasification

Tecnologia	Eficiência	Custo	Disponibilidade Comercial	Comentário
	(%)	(US\$ kW ⁻¹)		
Gaseificador/MCI	25- 30	900-1500	Sim	Poucos fornecedores
Gaseificador/motor Stirling	13-16	1120-3000	Não	Pré-comercial
Gaseificador/microturbinas a gás	25-30	1.500 - 1600	Não	Pesquisa aplicada
Gaseificador/células a combustível	40-55	3000-4000	Não	Pesquisa básica

- Projeto construção e testes de sistemas fornalha/motor Stirling para operação em regiões isoladas (Projeto CTNERG/CEMIG a ser desenvolvido conjuntamente com a Universidade Técnica de Dinamarca).
- Modelagem e testes de uma célula SOFC de 5 kWe fabricada pela Fuel Cells e de sistemas híbridos com microturbinas. Avaliação da possibilidade e dos requerimentos para o acoplamento desta célula SOFC a um gaseificador de biomassa.

No Quadro 3 está uma visão geral das tecnologias de produção de eletricidade a partir da gaseificação da biomassa, com valores de referência para seus parâmetros técnico-econômicos básicos, assim como a valoração da sua disponibilidade comercial.

7 CONCLUSÕES

- A tecnologia de gaseificação de biomassa com maior maturidade tecnológica e comercial para a sua utilização em programas de eletrificação de regiões isoladas é a que utiliza motores de combustão interna como acionador primário. Projetos para teste e adaptação dos gaseificadores existentes no mercado devem ser estabelecidos, simultaneamente com a recuperação da capacidade nacional de projeto e fabricação destes equipamentos.

- O motor Stirling acoplado a gaseificadores de biomassa tem um grande potencial para aplicação em programas de eletrificação de regiões isoladas, dada à sua facilidade de operação e manutenção. Devem ser realizados testes do uso desta tecnologia a longo prazo, visando a produção nacional a preços competitivos como objetivo final.

- Visando o domínio de tecnologias avançadas e aplicações em grande escala a médio prazo, devem-se incentivar as pesquisas relacionadas com a operação conjunta de microturbinas a gás e células a combustível com gaseificadores de biomassa, incluindo os sistemas híbridos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIES, J.; ARAVIND, P. V.; SPLETHOFF, H. Influence of fuel gas components on SOFC Operation downstream of a thermochemical biomass gasifier. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ENGINEERING, 3., 2003, Kobe. **Proceedings...** Kobe: ICOPE-03), 2003. p. 9-13.

BARCHEWITZ, L.; PALSSON, J. Design of an SOFC system combined to the gasification of biomass. In: EUROPEAN SOFC FORUM. Lucerne, Switzerland, 2000. p. 59-68.

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management**, v. 23, p. 1-15, 2003.

- BHATTACHARYA, S. C. et al. A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system. **Biomass and Bioenergy**, v. 21, p. 445-460, 2001.
- BRIDGEWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, p. 87-102, 2003.
- BULHER, R. State of technology in wood gasifying. In: HOLZENERGIE SYMPOSIUM, 3., 1994 Neue Erkenntnisse Zur Termishen Nutzung Von Holtz, Zurich, 1994. 29 p.
- BUHRE, B. J. P.; ANDRIES, J. Biomass-based, small-scale, distributed generation of electricity and heat using integrated gas turbine- fuel cell systems. In: ASME TURBO EXPO, 22., 2000, Munich. **Proceedings...** Munich: GT, 2000. 27 p.
- CARLSEN, H. et al. Results from tests of a Stirling engine and wood chips gasifier plant. 2002 (Comunicação pessoal)
- EQTEC IBERIA. Integrated biomass gasification power plants. Disponível em: <<http://www.energiaverde.com/Demo67es.pdf>>. Acesso em: maio 2004.
- ELSEBRUCH, T. From wood ... to Mega Watt: New biomass gasification power plant in Gussing/Áustria. **Wood Energy**, n. 1, p. 30-34, 2003.
- ECN, ECN BIOMASS NEWSLETTER. **Successful demonstration of gasifier SOFC fuel cell combination**, v. 2, n. 2, 2002.
- ENERGY FROM BIOMASS. Biomass gasification and fuel cell coupling via high temperature gas clean-up for decentralized electricity generation with improved efficiency. European Project ENK-CT2000-00314". Disponível em: <http://dsiaq1.ing.univaq.it/~bio_en/eu2000.html>. Acesso em: maio 2004.
- GUIGON, P.; LARGE, J. F. Environmental aspects of gasification. Commission of European Communities, EUR 12736, 1990. p. 115-131.
- HASLER, P.; NUSSBAUMER, T. H. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**, v. 16, p. 385-395, 1999.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN. **Energie aus biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren**. Springer: Springer Verlag, 2001. 770 p.
- KIVISAARI, T.; BJORNBOOM, P.; SYLWAN, C. Studies of biomass fuelled MCFC systems. **Journal of Power Sources**, p. 115-124, 2002.
- KNOEF, H. Review of small-scale biomass gasification. In: PYROLYSIS AND GASIFICATION OF BIOMASS AND WASTE EXPERT MEETING. Strasbourg. 2002. Disponível em: <http://www.ienica.net/usefulreports/pyrolysis3.pdf>>. Acesso em: 5 maio 2004.
- LOBACHYOV, K. V.; RICHTER, H. J. An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system. **Energy Conversion**, v. 39, n. 16, p. 1931-1943, 1998.
- MAHIN, D. B. **Energy from rice residues**. Arlington: Winrock International, 1990. 60 p.
- MUKUNDA, H. S.; DASSAPPA S.; SHRINIVASA, U. Open-top wood gasifiers. In: JOHANSSON, T. B. et al. (Eds.) **Renewable energy: Sources for fuels and electricity**. Washington D.C: Island Press, 1993.
- STASSEN, H. Small-scale biomass gasifiers for heat and power; a global review. World Bank, 1995. (Technical paper, 296)
- TMU. **Biomass for small-scale heat and power**. Forest Products Laboratory, Technology Market Unit, 2003. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/tmu.publications.htm>>. Acesso em: 5 maio 2004.
- KALTSCHMIT, M. Biomass gasification for power and fuel generation: conference report. **GasNet**, v. 5, p. 16-17, 2004.