



UTILIZAÇÃO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PROVENIENTE DE UM FORNO INDUSTRIAL POR MICRO-ONDAS PARA OBTENÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

L. A. VIEIRA^{1,2,4}, E. P. TEIXEIRA^{1,2,5}, A. M. B. SILVA^{1,2}, E. U. BUCEK^{1,3}, R. N. TOLEDO^{2,4}

¹ Universidade de Uberaba - Mestrado Profissional em Engenharia Química

² Universidade de Uberaba - Curso Graduação em Engenharia Elétrica

³ Universidade de Uberaba - Curso Graduação em Engenharia Ambiental

⁴ ONDATEC - Tecnologia Industrial em Micro-ondas LTDA

⁵ SIC - Sistemas Inteligentes de Controle LTDA

RESUMO – O processo de utilização dos gases provenientes da carbonização de madeira em forno micro-ondas visou desenvolver uma solução para propiciar a geração de energia elétrica por meio do aproveitamento dos gases da carbonização de madeiras sem admissão de ar atmosférico. Pelo fato do forno trabalhar em atmosfera controlada, ele consegue produzir um gás com elevado poder calórico em relação aos demais processos que utilizam a injeção de oxigênio durante a fase endotérmica e provocam o arraste de finos, cinzas e nitrogênio nos gases, reduzindo o poder calórico, aumentando-se o custo da recuperação do bio-óleo e a disponibilidade energética. O melhor resultado para obtenção de energia elétrica foi a utilização do ciclo combinado, ou seja, uso da turbina a gás em cascata com a turbina a vapor. Esse processo sempre foi conhecido pelo mercado por causa do elevado rendimento na conversão da energia térmica para elétrica, mas a turbina projetada para o óleo de pirólise (turbina a gás) é novidade para o setor.

1. INTRODUÇÃO

O processo de carbonização produz basicamente: carvão e fumaça tóxica composta por uma mistura de gases não condensáveis (GNC) e condensáveis (GC), denominados por bio-óleo (alcatrão e ácidos pirolenhosos). A tecnologia arcaica de produção do carvão industrial não favorece o aproveitamento dos efluentes gasosos. Assim, uma tonelada de madeira é convertida em 250 kg de carvão e 750 kg de fumaça.

Setenta e cinco por cento (75%) da floresta se transforma em fumaça na indústria do carvão vegetal por causa da tecnologia usada na carbonização. A troca de tecnologia permitirá aproveitar integralmente a energia da madeira, reduzindo a poluição e gerando energia elétrica com o aproveitamento da fumaça da indústria de carvão.



É sabido que há muito tempo as empresas mineiras buscam formas de aprimorar a produção de carvão vegetal e de aproveitamento dos efluentes, mas sem grandes evoluções na técnica e no aproveitamento energético dos resíduos.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é demonstrar uma forma de disponibilidade imediata da energia contida na fumaça oriunda da pirólise gerada pela Tecnologia ONDATEC, onde a cada tonelada de carvão produzida há uma disponibilidade de energia térmica de mais de 7 MWh, em média, considerando uma eficiência energética da ordem de 30%, sendo conservador, pois o ciclo combinado permite obter valores da ordem de 40%, para o sistema de geração, e pode-se gerar mais de 2 MWh por tonelada de carvão. Este estudo se justifica, sabendo-se que toda essa quantidade de energia é desperdiçada nos processos convencionais de carbonização com a consequente emissão de poluentes para atmosfera.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A ONDATEC[®] - Tecnologia Industrial em Micro-ondas projetou um forno industrial contínuo com foco no aproveitamento dos efluentes, Figura 1. Essa tecnologia reduz o tempo de produção do carvão de 15 dias para 3 horas e com aproveitamento integral dos efluentes. Além disso, o carvão apresenta qualidade maior pela facilidade do controle de temperatura.



Figura 1: Forno Protótipo de Engenharia
Fonte: ONDATEC (2010).

Dados do Balanço Energético Nacional 2015 demonstraram um aumento de 2,9% do consumo final de eletricidade no país. E pelo terceiro ano consecutivo houve um decréscimo de 7,6% da oferta de energia hidráulica, recuando a participação de renováveis na matriz elétrica de 78,3% em 2013 para 74,6% em 2014. Como consequência, observou-se o aumento de geração térmica, principalmente movidas a combustíveis fósseis como carvão mineral e gás natural.

Com relações as contribuições de diversas fontes para a geração de energia elétrica no Brasil, Figura 2, pode-se observar que o uso de carvão e seus derivados superaram o uso de fonte nuclear e



eólica. Ainda de acordo com o Balanço Energético Nacional 2015, sobre a repartição da oferta interna de energia, 39,4% da produção de energia provém de fontes renováveis (incluindo importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica) e 60,6% de fontes não renováveis, mostrando um aumento do uso de fontes não renováveis com relação a 2013 que foi de 59%.

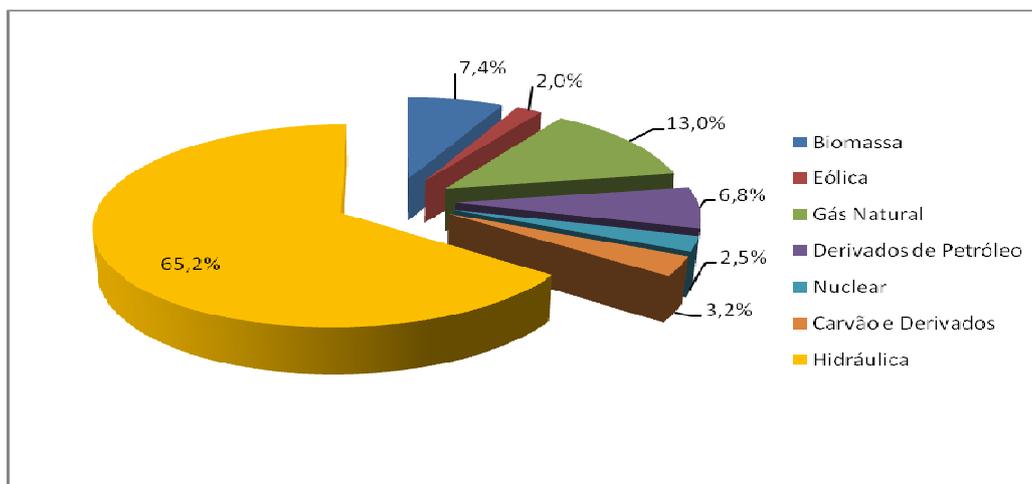


Figura 2: Repartição da oferta interna de energia elétrica do Brasil.
Fonte: Adaptado de EPE (2015).

Em termos energéticos, a lenha representa uma importante aliada. Em 2014, segundo dados do Balanço Energético Nacional (2015), esta correspondeu a 29,3% da biomassa utilizada na produção de energia significando 8,1% da matriz. De acordo com o Anuário Estatístico da Agroenergia (2014), o Brasil é um dos principais produtores de lenha do mundo. O país apresentou em 2012 uma produção de 83,02 milhões de toneladas de lenha, sendo a maior parte representada por eucaliptos, com o intuito de se obter como destino final o carvão vegetal.

O Brasil, por apresentar uma relevante indústria siderúrgica verde, é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, representando 14% de toda a produção mundial (Anuário Estatístico da Agroenergia (2014)). Este anuário afirma que, no ano de 2012, aproximadamente 35% de toda a produção de lenha do país foi transformada em carvão vegetal. E a conversão da madeira em carvão provê perdas de 70 a 75% da lenha, já que o rendimento gravimétrico médio de carvão varia entre 25 a 30% da massa da madeira (CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos).

Uma das alternativas para a geração de energia elétrica limpa e sustentável é a utilização dos efluentes, tais como: bio-óleo e gases não condensáveis, provenientes da carbonização da madeira com o uso de forno de micro-ondas, para a produção de carvão vegetal como combustível para sistemas de cogeração. De fato, a carbonização da madeira, além de produzir carvão vegetal, gera grande quantidade de efluentes líquidos e gasosos. A Tabela I apresenta a quantidade dos produtos e subprodutos (carvão vegetal, ácido pirolenhoso, alcatrão e gases não condensáveis) gerados durante a carbonização de certa espécie madeira, por meios convencionais, em diferentes faixas de temperatura. Os principais componentes dos gases não condensáveis gerados durante o processo de carbonização da madeira são: o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO), o nitrogênio (N_2), o



metano (CH_4), o hidrogênio (H_2) e hidrocarbonetos (C_nH_{2n}). Já o alcatrão e o ácido pirolenhoso são formados por diversos compostos orgânicos.

Tabela I. Rendimentos gravimétricos médios de carvão, alcatrão, ácido pirolenhoso e gases não condensáveis, em relação à madeira seca. Adaptado de VALENTE (1985). Tratamento Gases não condensáveis (%) *.

Tratamento	Carvão (%)	Alcatrão (%)	Ácido pirolenhoso (%)	Gases não condensáveis (%) *
300°C	44,49	2,92	20,06	32,53
375°C	36,42	3,55	18,27	41,77
450°C	32,79	3,81	13,77	49,63
525°C	30,05	3,49	14,85	51,61
600°C	28,63	4,39	14,97	52,01

*Obtido por diferença.

Um dos produtos com grande potencial é o bio-óleo (efluente condensável). Este produto líquido é constituído por uma mistura complexa de compostos químicos, apresentando mais de 300 compostos distintos, sendo a maioria compostos oxigenados. O óleo proveniente da pirólise da biomassa possui características pouco atraentes para o uso como combustível, quando comparado com os combustíveis fósseis, como elevado teor de água, acidez, viscosidade e corrosividade. Apesar de todas estas características e mesmo apresentando um poder calorífico inferior, o bio-óleo é um recurso energético que representa 30% ou mais da biomassa e apresenta potencial para muitas aplicações entre elas a produção de energia elétrica. E há ainda os gases não condensáveis que apresentam quantidade significativa, embora possuam baixo poder calórico, precisam ser aproveitados.

O FORNO de processamento contínuo Tecnologia ONDATEC[®] apresenta as seguintes características: potência 300 kW, tensão de alimentação 380 V, 60 Hz, comprimento total de 42 m, com velocidade da esteira ajustada por inversor de frequência, 300 válvulas emissoras de micro-ondas com controle de acionamento manual e automático, com sistema de separação de gases condensáveis (GC) e gases não condensáveis (GNC). O forno tem capacidade de aproximadamente 8,8 m³/madeira. A madeira é toletada em pedaços de 20 cm de altura e inseridas no forno manualmente, no sentido de garantir a mínima entrada de oxigênio no seu interior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foram utilizados um gerador estacionário de 500 kVA convertido para biogás, como mostram as Figuras 3 e 4, para geração de energia por meio do gás GNC e outra máquina estacionária de 500 kVA para geração de energia elétrica utilizando o gás GC (Bio-óleo), Figura 5.



Figura 3. Gerador a Diesel modificado para GNC com ciclo Otto. Fonte: ONDATEC (2016)



Figura 4. Gerador a GNC. Fonte: ONDATEC (2016).

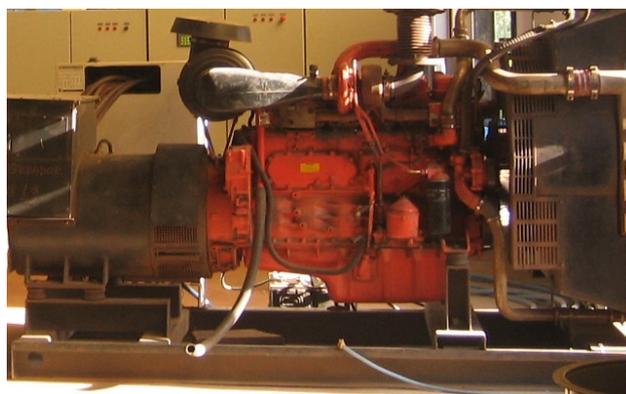


Figura 5. Gerador Diesel usado com o Bio-óleo. Fonte: ONDATEC (2016)

A produção de energia usando o gerador a gás apresentou rendimento abaixo do esperado: 26%. A expectativa inicial era a obtenção do rendimento teórico de 35%. A dificuldade encontrada está associada com potência relativamente elevada do gerador (500kVA) para uma baixa produção de GNC. O protótipo conseguiu produzir no máximo 200 kg de carvão por hora, 163 kg de gás e 240 kg de óleo. Em termos energéticos, havia apenas 175 kWh térmico por hora de funcionamento do forno protótipo. Certamente, isso contribuiu para reduzir o rendimento do moto-gerador a gás.

Em relação ao uso do bio-óleo, embora tenha bom potencial energético e as medições em laboratório comprovaram isso, apresenta elevada viscosidade e baixo pH. Houve a necessidade de reduzir a viscosidade cinemática de 44 para 2 mm²/s, por meio da emulsificação com etanol, de forma a obter o mesmo valor encontrado no combustível diesel. O bio-óleo contribuiu para danificar os bicos injetores do motor diesel, provocando corrosões e entupimentos frequentes. Além disso, uma relação baixa de ar/bio-óleo, provocou a formação de resíduos carbonosos nas camisas dos pistões. Isso, inviabilizou o uso do bio-óleo em moto-geradores a diesel.



O bio-óleo apresentou excelente combustão e não houve formação de resíduos na câmara de combustão dos queimadores construídos para esse fim, Figuras 6, 7 e 8, mesmo variando o teor de água em sua composição.

As Figuras 6 e 8 mostram os tipos de queimadores utilizados na queima direta do bio-óleo nos fornos desenvolvidos em escala industrial. A Figura 7 mostra um queimador desenvolvido para testes laboratoriais. Em todos os queimadores pode-se ter uma ideia do desperdício de energia na produção de carvão vegetal em fornos tradicionais.



Figura 6. Teste de queima do bio-óleo com eucalipto Urograndis.
Fonte: ONDATEC (2016).



Figura 7. Teste de queima do bio-óleo em escala laboratorial.
Fonte: ONDATEC (2016).



Figura 8. Teste de queima do bio-óleo com eucalipto Grandis.
Fonte: ONDATEC (2016).

Diante do bom resultado da queima direta do bio-óleo, sem a operação de emulsificação com etanol e pela simplicidade técnica, a equipe procurou outras possibilidades técnicas para gerar energia elétrica através da queima do óleo.

As principais estudadas foram:

- Queima direta em caldeira a vapor;
- Queima direta em turbina a gás;
- Ciclo combinado cascadeando a turbina a gás, caldeira e turbina a vapor – Ciclo combinado com carvão, bio-óleo e GNC.

Como o forno a micro-ondas demanda aproximadamente 300 kWh por tonelada de madeira processada, passa a ser vital para a tecnologia, ter um sistema de aproveitamento dos efluentes da carbonização de forma a permitir auferir todos os ganhos do processo. Para tanto, depois de pesquisa no mercado, a ONDATEC entrou em contato com a empresa OPRA (Fig. 9), fabricantes de turbinas a gás na Holanda, que desenvolveu uma turbina especificamente para uso nos processos de pirólise (Fig. 10). Essa inovação trouxe outra luz para o projeto, permitindo trabalhar com o ciclo combinado na geração de energia elétrica e a eliminação do etanol na emulsificação do bio-óleo.



Figura 9. Turbina OPRA para bio-óleo e GNC.
Fonte: OPRA (2015).

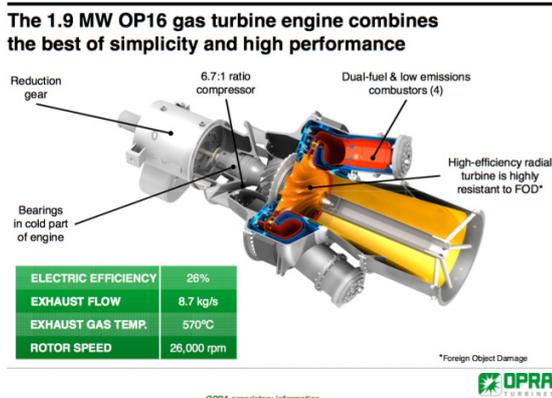


Figura 10. Turbina a gás.
Fonte: OPRA (2015).

As vantagens do ciclo combinado, uso da turbina a gás em cascata com a turbina a vapor, sempre foram conhecidas pelo mercado por causa do elevado rendimento na conversão da energia térmica para elétrica, mas a turbina projetada para o óleo de pirólise é novidade para o setor.

Os dados do fabricante são motivadores:

- eficiência elétrica de 26%;
- bi-combustível: óleo e GNC
- temperatura do gás de exaustão: 570°C
- teor de Oxigênio nos gases de exaustão: 55%

A ideia básica é aproveitar o calor dos gases de exaustão da turbina a gás/óleo e direcioná-los à câmara de uma caldeira de recuperação, gerando vapor para outra turbina. Assim, serão dois geradores de energia elétrica trabalhando simultaneamente.

Graças a esse aproveitamento energético é que é possível obter rendimentos superiores a 40%, determinado por experimento ONDATEC. Outra vantagem é que o custo da caldeira de recuperação é menor que da caldeira a biomassa, pois a câmara de combustão é menor e não há necessidade de sistemas de limpeza, já que o combustível é limpo.

5. CONCLUSÕES

1. Os efluentes da pirólise são passíveis de serem utilizados na geração de energia elétrica com os equipamentos adequados;
2. O GNC pode ser utilizado tanto em geradores a gás ou queimado em turbinas a gás existentes no mercado apresentando rendimento na conversão de energia elétrica de 26%;
3. 3/4 da floresta se transforma em fumaça na indústria do carvão vegetal por causa da tecnologia usada na carbonização. A troca de tecnologia permitirá aproveitar integralmente a energia da madeira, reduzindo a poluição e gerando energia elétrica com o aproveitamento da fumaça da



indústria de carvão, mas esse benefício implica em grandes investimentos para: a troca dos fornos de carvão e a instalação das termelétricas no site do fabricante.

4. Com o uso de mais fontes renováveis como o da biomassa (carvão vegetal, GC e GNC), pode-se diminuir a porcentagem de importação de eletricidade oriunda de fontes hidráulicas e diminuir o uso de fontes não renováveis, contribuindo para o meio ambiente e diminuição do custo da energia elétrica no país.

6. REFERÊNCIAS

VALENTE, O. F.; ALMEIDA, J. M.; VITAL, B.R.; LUCIA, R. M. D. *Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido*. Revista *Árvore*, Viçosa, v.9, N.1, p. 28-39, 1985.

QUIRINO, W. F. et al. *Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos*. Revista da Madeira, v. 89, p. 100-106, 2005. Disponível em: <<http://funtecg.org.br>> Acesso em: 2014.

RIBEIRO, S. K.; REAL, M. V. *Novos Combustíveis*. 1ª ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. 92p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Matriz Energética Nacional 2015*. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>> Acesso: 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica*. Ano IX, nº 99. 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>> Acesso: 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2015*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>> Acesso: 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Modernização da Produção de Carvão Vegetal 2015*. Disponível em: <<https://www.cgee.org.br/>> Acesso: 2015