

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA¹

Analysis of the Efficiency of a Pilot Plant Built to Generate Electric Energy Using Biomass

Giorgiana Freitas Pinheiro², Robson Santos³ e Gonçalo Rendeiro⁴

Resumo: O principal objetivo deste trabalho foi efetuar a avaliação da eficiência do ciclo a vapor, utilizando os diversos tipos de biomassa de resíduos florestais e de agroindústrias disponíveis na região Amazônica, como também suas misturas, a partir dos dados obtidos em usina piloto implantada do Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, em ensaios de laboratório e simulações computacionais.

Palavras-chave: Biomassa, geração de energia, ciclo a vapor e eficiência.

Abstract: The main objective of this work was to evaluate the efficiency of vapor cycle, using several types of forest residue and agro-industry biomass, available in the Amazon region, as well as their mixtures, based on data obtained from a pilot plant set up by the Laboratory of Mechanic Engineering of the Universidade do Para, using laboratory assay and computational simulations.

Keywords: Biomass, energy generation, vapor cycle and efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Uma das alternativas de combustível não-convencional para geração de energia elétrica é a biomassa constituída por resíduos agroindustriais e florestais. Na Amazônia, em particular no Estado do Pará, há produção considerável de resíduos florestais e grande disponibilidade de recursos naturais com possibilidade de aproveitamento energético (caroço de açaí, casca de castanha-do-pará e palmeiras diversas), como combustível em usinas térmicas a vapor. A vantagem da queima

direta desses resíduos em usinas térmicas a vapor é o reduzido custo do calor gerado, uma vez que não há o processamento da biomassa a fim de obter características mais homogêneas para o combustível. Este fato proporciona um custo de geração de energia mais competitivo, porém ainda é necessário mais estudos sobre o comportamento do ciclo, considerando a grande heterogeneidade dos resíduos que serão utilizados sem processamento prévio, tendo em vista que características como umidade e granulometria podem inviabilizar a operação de uma unidade geradora.

¹ Recebido para publicação em 4.5.2006 e aceito em 14.7.2006.

² M.S., Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará – DEEC/UFPA, Rua Augusto Correa, nº 1, 66075-900 Belém-PA, <giorgiana.pinheiro@redecelpa.com.br>; ³ Engenheiro do Departamento de Engenharia Mecânica - DEM/UFPA, <robsonjes@msn.com>. ⁴ M.S., Prof. do Departamento de Engenharia Mecânica – DEM/UFPA, <rendeiro@ufpa.br>.

Este trabalho apresenta dados referentes ao monitoramento de uma usina piloto de geração de energia elétrica baseada no ciclo Rankine, implantada no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA. O sistema é todo instrumentalizado, o que possibilita monitorar vários parâmetros de funcionamento do sistema de geração, como: quantidade de biomassa no tempo, pressão de saída do vapor na caldeira, pressão de entrada e saída do vapor na turbina, rotação do gerador, temperaturas de entrada e saída no condensador, ph-metria e condutividade da água de alimentação da caldeira, tensão e potência em cada fase.

O principal objetivo foi efetuar a avaliação da eficiência do ciclo a vapor, utilizando os diversos tipos de biomassa de resíduos florestais e de agroindústrias disponíveis na região, como também suas misturas.

2 DESCRIÇÃO DA USINA PILOTO

A planta piloto de geração de energia elétrica utilizada é baseada no ciclo Rankine, utilizando vapor d'água como fluido de trabalho. É composta de uma caldeira fogotubular dotada de uma fornalha tubular com grelha refrigerada, turbina de condensação de um único estágio, gerador, condensador, sistema de bombeamento, e tanque de condensado e sistema de tratamento de gases, como mostrado na Figura 1. A unidade geradora é automatizada, sendo possível monitorar vários parâmetros de funcionamento do sistema de geração, como: quantidade de biomassa no tempo, pressão de saída do vapor na caldeira, pressão de entrada e saída do vapor na turbina, rotação do gerador, temperaturas de entrada e saída no condensador, ph-metria, condutividade, tensão e correntes

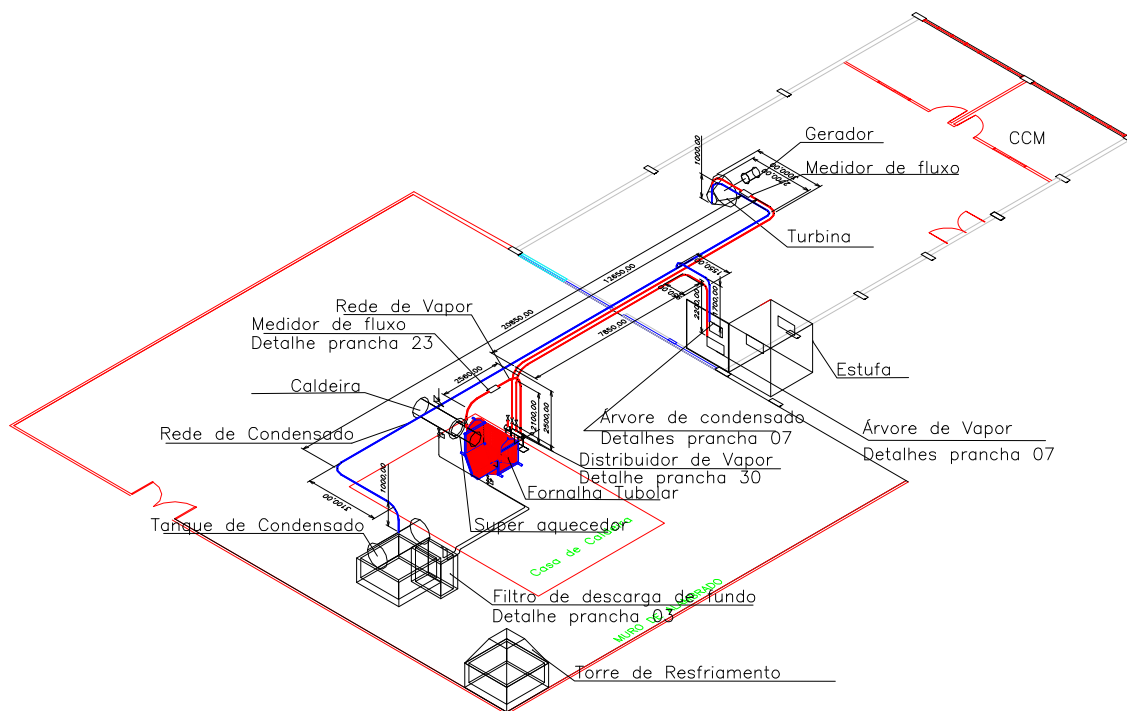


Figura 1 – Isométrica de vapor e condensado da usina piloto.

Figure 1 – Pilot plant vapor and condensed isometrics.

em cada fase e consumo de energia. As especificações técnicas dos componentes da planta estão no Quadro 1 e a relação de sensores instalados podem ser vistos no Quadro 2. Esse monitoramento é realizado por um aplicativo escrito sob a plataforma Eclipse SCADA, implantado no centro de controle e monitoramento da usina (CCM). Para captação dos sinais, um conversor A/D (analógico/digital), com resolução de 16 bits, se encarrega de converter os sinais analógicos em digitais. Dados em tempo real são apresentados de forma numérica, em tabela, na tela do sinótico, gerando arquivos dat. Os dados referentes a esses quadros são armazenados, para posterior acesso.

3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório foram realizados em amostras de resíduos do setor agroindustrial e madeireiro, para determinação de sua composição química imediata (teor de voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas), umidade, poder calorífico e densidade a granel e obtenção das densidades energéticas. O objetivo foi obter informações desses resíduos como combustível que possam ser adotados em simulações computacionais do ciclo Rankine, para análise comparativa com desempenho de uma usina piloto que opera com esses combustíveis.

Quadro 1 – Especificações técnicas dos principais equipamentos

Table 1 – Technical specifications of the main components

Fornalha	Caldeira	Turbina	Gerador	Condensador
Fab. Montex Grelha refrigerada Tabular PMTA: 12 kg cm ⁻² Superfície de aquecimento: 4,2 m ²	Fab. Montex PMTA: 12kg cm ⁻² Superfície de aquecimento: 16 m ² Categoria: B Capacidade: 350 kg h ⁻¹	Fab: Coppus Turbine Mod: RL12L Rotação: 3000 rpm S/Trip RPM: 3810 Stream press: 140 Steam temp. °F/°C: 460 / 237,78	Fab: KOHLBACH Tipo: Síncrono Compound trifásico Freq.: 60Hz Pol.: 4 Mod.: 132LA Potência 7.5 kva/6KW Corrente: 19,7A Rotação: 1.800 rpm	Fab: Coppus Turbine Mod. CD12L Stream press max: 100 Heat exch.: 90.000 kcal h ⁻¹

Quadro 2 – Relação de sensores instalados na usina piloto

Table 2 – List of the sensors installed at the pilot plant

Sensor	Subsistema	Modelo	Localização	Fabricante	Quantidade
Sensores de Temperatura	Caldeira	Tipo S	Fornalha	Pirométrica	2 (dois)
		Tipo J	Caldeira	Pirométrica	2 (dois)
	Turbina	Tipo J	Turbina	Pirométrica	3 (três)
	Trocador de calor	Tipo k(Pt-100)	Trocador de calor	Pirométrica	7 (sete)
	Estufa	Tipo K(Pt-100)	Estufa	Pirométrica	2 (dois)
Sensores de pressão eletrônicos	Caldeira	TP:0-30bar	Saída do vapor vivo da caldeira	Spirax Sarco	1 (um)
	Turbina	TP:0-30bar	Entrada de vapor vivo da turbina	Spirax Sarco	1 (um)
		TP:0-15bar	Rotor da turbina	Spirax Sarco	1 (um)
Sensor de nível	Caldeira	LP10-4	Caldeira	Spirax Sarco	1 (um)
Sensor de pH/conductividade	Caldeira	DLCD	Caldeira	Blowair	1 (um)
Célula de carga	Silo	L-2T	Silos	Alfa Instrumentos	16 (dezesesseis)

Para execução dos ensaios foram adotadas as seguintes normas brasileiras existentes para carvão vegetal, que se adequaram aos resíduos estudados, conforme avaliações realizadas em Pinheiro et al. (2004):

- NBR 6923 – Carvão Vegetal - Amostragem e Preparação da Amostra, que define os procedimentos de coleta e preparação de amostras para realização de ensaios de caracterização de carvão vegetal.
- NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata, destinada à determinação dos teores de umidade, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo de carvão vegetal (ABNT, 1986).
- NBR 8633 – Determinação do Poder Calorífico, prescreve o método de determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática (ABNT, 1984).
- NBR 6922 – Determinação da Massa Específica (Densidade a Granel), prescreve o método de determinação da massa específica do carvão vegetal como recebido (ABNT, 1981).

A partir dos resultados dos ensaios de análise química imediata, umidade e densidade a granel foram determinados, através de cálculos, o poder calorífico inferior – PCI – e a densidade energética das biomassas para comparação do seu desempenho como combustível, da seguinte maneira:

a) densidade energética (quantidade de energia por unidade de volume de um combustível) foi obtida pelo produto do PCI com a densidade a granel das amostras; e

b) poder calorífico inferior foi obtido através da equação 1 (JEN, 1987):

$$PCI = (1-a).PCS - 9.(1-a)h.h_{lv(25^{\circ}C)} - a.h_{lv(25^{\circ}C)} \quad (\text{eq. 1})$$

em que PCI = poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}); PCS = poder calorífico superior (kcal kg^{-1}); a = umidade base úmida (%); h = percentual de hidrogênio do material seco (%); e $h_{lv(25^{\circ}C)}$ = entalpia de vaporização da água a $25^{\circ}C$ (kcal kg^{-1}), igual a $583,58 \text{ kcal kg}^{-1}$.

O teor de hidrogênio foi calculado a partir da seguinte equação empírica (fórmula de Seyler), obtida em Gomide (1984):

$$h = 0,069 \cdot \left(PCS' \cdot \frac{1}{100} + MV' \right) - 2,87 \quad (\text{eq. 2})$$

$$PCS' = PCS \frac{100}{(MV + CF)} \quad (\text{eq. 3})$$

$$MV' = MV \frac{100}{MV + CF} \quad (\text{eq. 4})$$

em que: h = percentual de hidrogênio; PCS' = poder calorífico em base seca e isenta de cinza (kcal kg^{-1}); MV' = percentual de matéria volátil em base seca e isenta de cinza; MV = percentual de voláteis; e CF = percentual de carbono fixo.

Os resultados dos ensaios de laboratório indicaram que há pouca influência do tipo de biomassa no poder calorífico superior. Este parâmetro, de modo geral, mostrou-se similar para todos os resíduos, com valores na faixa de 4.500 a $5.000 \text{ kcal kg}^{-1}$.

Quanto ao poder calorífico inferior constatou-se também pouca influência do tipo de biomassa neste parâmetro, sendo a umidade a característica que influenciou mais significativamente os resultados de PCI; maiores valores de umidade implicaram redução significativa dos valores de PCI.

Quanto à análise química imediata, todas as amostras apresentaram valores semelhantes, dentro das seguintes faixas:

- teor de voláteis – entre 75 e 85%;
- teor de cinzas – entre 0 e 5%; e

- teor de carbono fixo – entre 15 e 25%.

O parâmetro mais significativo para a densidade energética dos resíduos foi a densidade a granel. Aqueles com maior densidade a granel apresentaram maior densidade energética, indicando melhor desempenho como combustível, sendo eles: caroço de açaí, casca de amêndoa e quenga de coco. Já a serragem, cuja densidade a granel é menor, de modo geral apresentou menor densidade energética, independentemente do PCI. O bom desempenho dos resíduos com maiores densidades a granel deve ser avaliado, considerando também a umidade com que eles são disponibilizados; resíduos com umidades acima de 45% (base úmida) são considerados inadequados para aproveitamento como combustível, conforme trabalho de Brascep (1987).

Os resultados dos ensaios das misturas de dois tipos de resíduos foram aproximadamente a média ponderada dos valores obtidos para as amostras, quando ensaiadas individualmente.

Por fim, os resultados dos ensaios de laboratório indicaram que podem ser adotadas de 4.500 a 5.000 kcal kg⁻¹ como valor típico de PCS de resíduos vegetais. Sendo o PCI dependente da umidade, pode-se considerar para umidade em torno de 30%, PCI de 3.000 kcal kg⁻¹ para resíduos vegetais.

Quanto à densidade a granel de serragem, podem ser adotados valores na faixa de 150 kg m⁻³ (madeiras leves) a 250 kg m⁻³ (madeiras pesadas), sendo assim a densidade energética estaria na faixa de 450.000 a 600.000 kcal m⁻³.

5 ANÁLISE ENERGÉTICA DA UNIDADE PILOTO

A formulação da análise energética de cada um dos componentes da planta foi baseada nas 1ª e 2ª leis da termodinâmica (BEJAN, 1984; ÇENGEL e BOLES, 1998;

MORAN e SHAPIRO, 2002), que resultou no desenvolvimento do *software* Rkebma.

Os cálculos são efetuados a partir dos seguintes parâmetros:

- fluxo de biomassa;
- PCI (kJ kg⁻¹) e umidade do resíduo agroindustrial
- PCI (kJ kg⁻¹) e umidade do resíduo da indústria madeireira;
- pressão (bar) e temperatura (°C) do vapor na saída da caldeira;
- pressão (bar) e temperatura (°C) do vapor na entrada da turbina;
- temperatura do vapor na saída da turbina, em °C;
- temperatura do vapor condensado na saída do condensador, em °C; e
- temperatura do vapor condensado na entrada da bomba de alimentação da caldeira, em °C.

Pelo *software* obtêm-se os valores para as seguintes variáveis do sistema:

- Potência total gerada no ciclo (kW);
- fluxo total de calor cedido no ciclo (kW);
- fluxo total de calor rejeitado no ciclo (kW);
- eficiência da caldeira (%);
- eficiência da turbina (%); e
- rendimento térmico do ciclo (%).

A Figura 2 mostra o esquema da usina piloto, configuração de ciclo Rankine com superaquecimento.

A partir dos dados obtidos em tempo real da planta foi calculada a eficiência do ciclo, utilizando a equação 5:

$$\eta_{\text{Ciclo}} = \frac{\dot{W}_T - \sum_i \dot{W}_{B,i}}{\dot{Q}_V} \quad (\text{eq. 5})$$

Os resultados de eficiência do ciclo são mostrados na Figura 3.

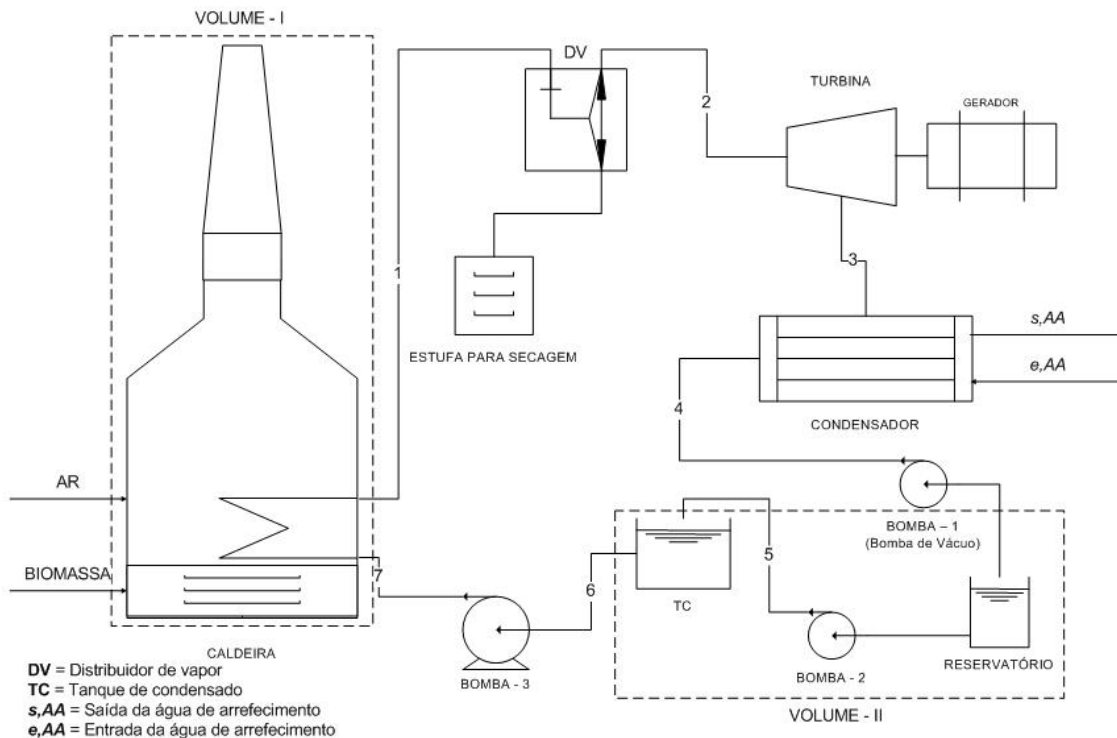


Figura 2 – Diagrama esquemático da planta de potência a vapor da unidade piloto.
Figure 2 – Schematic diagram of the vapor cycle plant at the pilot plant.

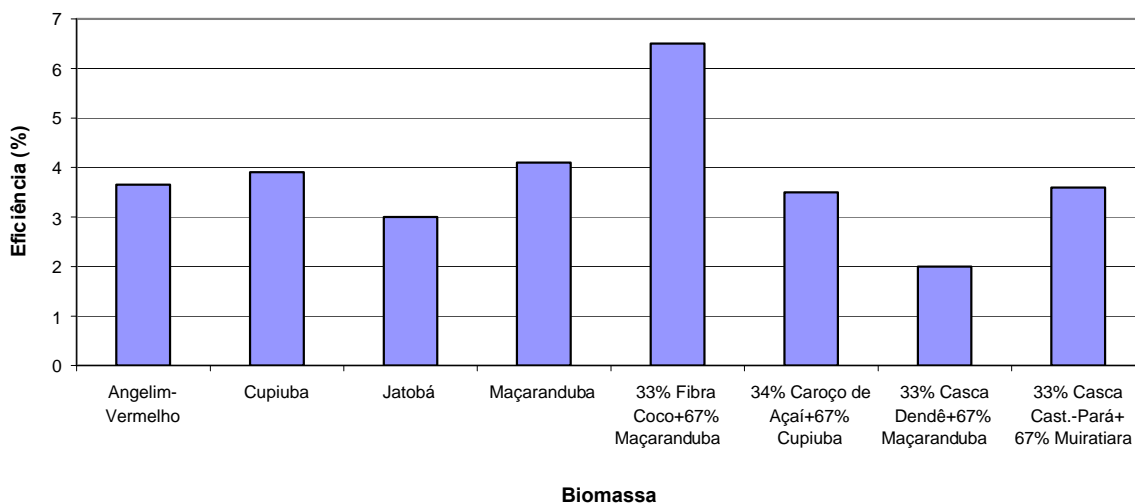


Figura 3 – Resultados dos ensaios de mixes de biomassa.
Figure 3 – Biomass mixture tests results.

A variação da eficiência do ciclo observada entre os diversos tipos de biomassa é função de suas diferentes velocidades de volatização e também das purgas de vapor ocorridas durante a operação da planta.

O consumo específico médio foi de 140 kg vapor por kW gerado.

6 CONCLUSÕES

A eficiência da planta mostrou-se baixa em função de sua distribuição espacial, por ter sido projetada e construída para fins didáticos. Este arranjo motivou uma elevada perda de calor e perda de carga na rede de vapor. Adicionalmente, o consumo específico mostrou-se compatível com a pressão de operação do vapor com o tipo de turbina utilizada.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6922 Carvão vegetal – determinação da massa específica (densidade a granel), Out/1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8112 Carvão vegetal – análise imediata, Out/1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8633 Carvão vegetal – determinação do poder calorífico, Out/1984.
- BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. New York: Wiley Interscience, 1984. 758 p.
- BRASCEP ENGENHARIA LTDA. Biomassa florestal (Madeira), caracterização e potencial, 1987. v. 1.
- CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. Boston: McGraw-Hill. 1998
- GOMIDE, R. Estequiometria industrial. 3.ed. São Paulo: 1984. 423 p.
- JEN, L. C. Estequiometria das reações de combustão, In: **Curso de Combustão Industrial**. São Paulo: AET IPT, 1987. p. 4-21.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 681 p.
- PINHEIRO, G.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. Resíduos do setor madeireiro: aproveitamento energético. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 199-208, 2004.
- REYNOLDS, W. C. “Thermodynamic properties in SI – graphs, tables and computation equations for 40 substances” Stanford: Stanford University; 1979.
- SONTAG, R. E., BORGNAKKE, C. Computer-aided thermodynamic tables. New York: John Wiley & Sons, 1996. CD-ROM.