

Eficiência energética de um gerador de vapor através do método indiretoWagner de Aguiar¹¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná / Campus de Francisco Beltrão.

wagneraguiar@utfpr.edu.br

Resumo: O trabalho foi desenvolvido nas dependências da empresa FOLEM Indústria e Comércio Ltda, localizada no município de Enéas Marques, no estado do Paraná, com coordenadas geográficas de 25° 56' 44" S e 53° 10' 19" O. O objetivo deste estudo foi à avaliação da eficiência energética de um gerador de vapor, com capacidade de produção de 20 toneladas de vapor por hora e pressão de trabalho de 10,6 Kgf.cm⁻². A metodologia utilizada foi o método indireto que avaliou as perdas pela chaminé, por radiação e convecção, por purgas, associadas à temperatura das cinzas e ao combustível não convertido presente nas cinzas, resultando nas perdas totais, que comparada ao poder calorífico fornecido pelo combustível (cavaco de madeira) resultou no valor da eficiência energética do sistema. Os resultados obtidos pelo estudo foram de 1.796,38 KJ.s⁻¹ de perdas pela chaminé, de 60,10 KJ.s⁻¹ de perdas por radiação e convecção, 852,81 KJ.s⁻¹ de perdas por purga, 28,20 KJ.s⁻¹ de perdas associadas à temperatura das cinzas, de 115,04 KJ.s⁻¹ de perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas, resultando nas perdas totais de 2.825,53 KJ.s⁻¹ e na eficiência do sistema de geração de vapor de 86,86%. Concluiu-se que as maiores perdas ocorreram pela chaminé devido ao arraste de calor pelo ar ambiente fornecido para combustão do cavaco, fortalecendo a grande importância da correta regulagem de entrada e do pré-aquecimento do ar na fornalha do sistema.

Palavras-chave: Eficiência energética, produção de vapor, perdas energéticas, processos industriais.

Energy efficiency of a steam generator by indirect method

Abstract: This research was developed at the premises of a company called FOLEM Indústria e Comércio LTDA, located in Enéas Marques, a town in the state of Paraná and whose geographic coordinates are 25° 56' 44" S and 53° 10' 19" W. The aim of this research was evaluating the energetic efficiency of a steam generator, whose production capacity is 20 tons of steam per hour, with working pressure corresponding to 10,6 Kgf.cm⁻². The methodology applied was the indirect method, which evaluated wastage through chimney, radiation and convection, as well as purges, associated to the temperature of the ashes and the non-converted fuel found in the ashes, resulting in total losses which, compared to the heating value provided by the fuel (wood chips), resulted in the energetic efficiency value of the system. The results of this research are: 1.796,38 KJ.s⁻¹ corresponding to chimney wastage, 60,10 KJ.s⁻¹ of wastage through radiation and convection, 852,81 KJ.s⁻¹ related to purges, 28,20 KJ.s⁻¹ due to the temperature of the ashes and 115,04 KJ.s⁻¹ corresponding to the loss associated to non-converted fuel found in the ashes. Consequently, the total wastage corresponds to 2.825,53 KJ.s⁻¹. As for the efficiency of the steam generation system, the results point to 86.86%. It is concluded that the greatest wastage happened through the chimney due to the spread of the heat caused by chip combustion, which emphasizes the importance of regulating the furnace air input and pre-heating systems.

Keywords: Energetic efficiency; steam production; energetic wastage; industrial processes.

Introdução

O setor industrial no Brasil é responsável por 35,1 % de toda energia consumida segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2013), no Balanço Energético Nacional – 2013, ano base 2012, apontando ainda segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI), Eletrobrás & Procel Indústria (2009), em levantamento realizado em 13 setores industriais, que 82% das oportunidades de economia de energia estão relacionados a processos térmicos.

O uso da energia está intimamente ligado ao desenvolvimento econômico de uma nação, bem como, com a qualidade dos recursos naturais e do meio ambiente envolvidos neste processo. O uso eficiente destes recursos possibilita uma menor necessidade de novas fontes de geração de energia, e conseqüentemente menores impactos ambientais negativos. O uso eficiente de energias possibilita ainda, a redução no uso de recursos naturais como carvão mineral, petróleo, gás natural, lenha, entre outros utilizados na geração de energias, e o conseqüente aumento de emissões de gases de efeito estufa.

Entre as diferentes formas de energia utilizadas na indústria, está à energia térmica gerada através de diversas fontes primárias, e utilizadas de diversas maneiras nos mais variados tipos de processos. Entre elas, destaca-se a energia térmica gerada por biomassa, mais especificamente por cavaco de madeira. Segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005), o setor industrial brasileiro apresenta em seus processos, diversos usos da energia térmica, como na secagem, desidratação, concentração, cozimento, produção de reações químicas e esterilização microbiológica. Estes processos térmicos são muito utilizados por indústrias de alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, química, farmacêutica e por quase todas as agroindústrias.

De acordo com o Balanço Energético Nacional, referente ao ano de 2012, a lenha é responsável por 10% da produção de energia primária total no país, e por 8,4% da energia utilizada no país, sendo que destes a grande maioria é utilizada na geração de vapor.

Um levantamento realizado em 13 setores industriais apontou que 82% das oportunidades de economia de energia estão nos processos térmicos (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, ELETROBRÁS e PROCEL INDÚSTRIA, 2009), podemos verificar a importância de uma regulação correta e da avaliação das perdas nos sistemas de geração de vapor.

Vapor nada mais é que água no estado gasoso. Segundo Russel (1994), a energia necessária para mudança de estado físico de um líquido, está intimamente ligada a duas variáveis principais, temperatura e pressão. Quanto maior for a temperatura do líquido, maior será a energia utilizada para a mudança de estado físico, no entanto a pressão age antagonicamente a temperatura no processo de mudança de estado físico. Sendo que, a uma maior pressão, ocorrerá um aumento nas forças intermoleculares do líquido, provocando a necessidade de maior quantidade de energia para mudança de seu estado físico, que terá como consequência, liberação de maior energia na mudança de estado físico inverso, ou seja, na passagem do estado gasoso para o líquido.

Marques, *et al* (2006) define os geradores de vapor ou caldeiras como equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior a atmosférica. Sendo assim, a água vaporizada a temperaturas superiores à temperatura de vaporização a pressão atmosférica, apresenta consequentemente maior armazenagem de energia em menores quantidades de massa de água, possibilitando maior eficiência no transporte e transferência de calor a diferentes usos que utilizam energia térmica em seus processos.

Devido ao intenso uso de combustíveis para produção de energia térmica em geradores de vapor, é normal que ocorram diversas perdas nestes processos. No entanto, estas perdas podem ser reduzidas, potencializando-se a transferência de energia pelos combustíveis para o processo por meio do vapor, analisando-se ponto a ponto o processo através da verificação da eficiência térmica do sistema, diagnosticando os principais pontos de perdas (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2005).

A eficiência energética ou térmica no caso dos geradores de vapor, segundo Marques, *et al* (2006), nada mais é que a relação entre o calor útil fornecido ao processo pelo combustível, sendo esta eficiência calculada de duas maneiras distintas, através do método direto e o indireto. O método direto avalia de maneira direta a quantidade de energia produzida na forma de vapor pela quantidade de energia fornecida pelo combustível, estabelecendo uma relação única de eficiência. Já o método indireto, apresentado por Centrais Elétricas Brasileiras (2005) e Gaspar (2004), utiliza a análise das principais perdas do gerador para obter o valor da eficiência. Verificando as perdas pela chaminé, por radiação e convecção, por purgas, associadas à temperatura das cinzas e ao combustível não convertido presente nas cinzas. Possibilitando a identificação dos principais pontos de perda, os quais devem receber maior atenção nas instalações, afim de, reduzir ao mínimo as perdas.

Dentro deste contexto, o presente trabalho avaliou a eficiência energética em um gerador de vapor alimentado por cavaco de madeira, aquotubular com capacidade de produção de 20

toneladas de vapor por hora e pressão de trabalho de 10,6 Kgf.cm⁻², através do método indireto, na Empresa FOLEM de Enéas Marques, estado do Paraná, que utiliza vapor no processamento térmico de subprodutos frigoríficos (vísceras e penas de aves), para a produção de farinhas e óleo de origem animal, utilizados na produção de rações.

Materiais e métodos

A metodologia utilizada para avaliação da eficiência energética do gerador de vapor da Empresa FOLEM foi o método indireto que avaliou as seguintes perdas: pela chaminé, por radiação e convecção, por purgas, associadas à temperatura das cinzas e ao combustível não convertido presente nas cinzas, de acordo com o apresentado por Centrais Elétricas Brasileiras (2005), Gaspar (2004) e conhecimentos teóricos e práticos do autor deste trabalho, tendo diversos cálculos adaptados ao sistema analisado.

Perdas pela chaminé

As perdas pela chaminé podem ocorrer de três maneiras principais: associadas aos gases secos que entram no sistema para a queima do combustível e os gases formados na combustão, associadas ao vapor presente na chaminé e ainda pela queima incompleta do combustível com formação de monóxido de carbono (CO).

$$P_{CH} = P_{GS} + P_V + P_{OI}$$

Perdas associadas aos gases secos (P_{GS})

De acordo com Centrais Elétricas Brasileiras (2005), este método analisou a perda de energia através da vazão mássica de ar e o referido calor específico médio do ar entre as temperaturas da chaminé e temperatura do ar na entrada do sistema.

$$P_{GS} = m_{GS} \cdot c_{Par} \cdot (T_{CH} - T_{Ref})$$

Onde:

P_{GS} = perdas por gases secos na chaminé (KJ.s⁻¹)

m_{GS} = vazão mássica dos gases que entram no sistema (Kg.s⁻¹)

c_{Par} = calor específico médio do ar entre T_{CH} e T_{Ref} [KJ.(Kg.°C)⁻¹]

T_{CH} = temperatura dos gases na chaminé (°C)

T_{Ref} = temperatura dos gases na entrada do sistema (°C)

Perdas associadas ao vapor presente na chaminé (P_V)

As perdas relacionadas ao vapor presente na chaminé derivam principalmente da umidade do cavaco de madeira e a água formada na reação de combustão da madeira, de acordo com o apresentado por Centrais Elétricas Brasileiras (2005):

$$P_V = m_P \cdot c_{PV}(T_{CH} - T_{REF}) + m_V \cdot h_V$$

Onde:

P_V = perdas relacionadas ao vapor na chaminé (KJ.s⁻¹)

m_P = vazão mássica total de vapor (Kg vapor.s⁻¹)

c_{PV} = calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{REF} (100°C) [KJ.(Kg.K)⁻¹]

m_V (m_P) = vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no cavaco [Kg.(Kg de cavaco)⁻¹]

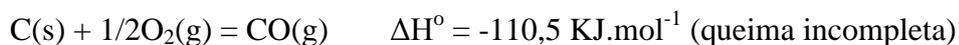
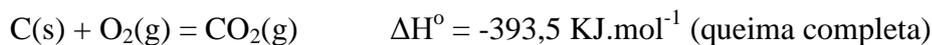
h_V = entalpia de vaporização da água na entalpia de referencia (KJ.Kg⁻¹)

T_{CH} = temperatura na chaminé (°C)

T_{Ref} = temperatura de referência (°C)

Perdas pela queima incompleta do combustível (P_{QI})

As perdas por queima incompleta do cavaco foram calculadas, levando-se em consideração a vazão mássica de gases na saída da chaminé, multiplicada pela concentração de monóxido de carbono (CO) na chaminé obtida através do analisador de gases de combustão, e relacionado à perda de energia para referida quantidade de monóxido de carbono CO formado na queima incompleta, segundo Russel (1994) adaptado:



De onde se pode observar que de cada 28 gramas de CO (1 mol) formados ocorre uma perda de energia de 283 KJ, o que leva a equação de perda pela queima incompleta de combustível:

$$P_{QI} = \frac{283 \cdot m_{CO}}{0,028}$$

Onde:

P_{QI} = Perda pela queima incompleta do combustível (KJ.s⁻¹)

m_{CO} = vazão mássica de CO (Kg.s⁻¹)

Perdas por radiação e convecção

As perdas por radiação e convecção foram realizadas de acordo com o apresentado por Gaspar (2004) adaptado, também chamada de perdas pela parede, sendo calculado pela seguinte equação:

$$P_{RC} = \frac{U \cdot A \cdot (T_s - T_a)}{3.600}$$

Onde:

P_{RC} = perdas por radiação e convecção (KJ.s⁻¹)

$U = U_r + U_c$ = coeficiente global de transmissão de calor [KJ.(h.m².°C)⁻¹]

A = área da superfície (m²)

T_s = temperatura da superfície (°C)

T_a = temperatura ambiente (°C)

3.600 = quantidade de segundo em 1 (uma) hora

Coefficiente de transmissão de calor por radiação (U_r)

$$U_r = \frac{20,4 \cdot E}{T_s - T_a} \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273,15}{100} \right)^4 \right]$$

Onde:

U_r = coeficiente de transmissão de calor por radiação [$\text{KJ} \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]

E = emissividade da superfície (adimensional)

Tabela 1. Valores típicos de emissividade da superfície

Valores típicos de E		
Aço oxidado	0,4	0,7
Alumínio polido (comercial)	01	
Alumínio oxidado (comercial)	0,2	0,3
Refratários	0,4	0,8
Aço pintado	0,8	0,9

Fonte: Gaspar (2004).

Sendo que o valor de emissividade da superfície será obtido a partir de uma média ponderada da contribuição de cada material em área e a sua respectiva emissividade.

Coefficiente de transmissão de calor por convecção (U_c)

$$U_c = B \cdot (T_s - T_a)^{0,25}$$

Onde:

U_c = coeficiente de transmissão de calor por convecção [$\text{KJ} \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]

B = fator de geometria (adimensional)

Tabela 2. Valores típicos de fator de geometria

Valores típicos de B	
Planos verticais e cilindros de grandes dimensões	5,22
Planos horizontais virados para cima	6,12
Cilindros horizontais	4,32

Fonte: Gaspar (2004).

Sendo que, este valor será calculado a partir de uma média ponderada dos valores típicos de fator de geometria, considerando a área contribuinte de cada estrutura e seu respectivo fator de geometria.

Perdas por purgas

As perdas por purga serão calculadas através da vazão de água que entra no sistema, que em teoria é a mesma quantidade que se perde, medida através de um hidrômetro, instalado na entrada do abrandador, multiplicado pelo calor específico da água e pela variação de temperatura.

$$P_p = m_p \cdot c_{pa} \cdot (T_p - T_{Ref})$$

Onde:

$$P_p = \text{perda por purga (KJ.s}^{-1}\text{)}$$

$$m_p = \text{vazão mássica de água de alimentação (Kg.s}^{-1}\text{)}$$

$$c_{pa} = \text{calor específico da água de acordo com Rersnick, et al (2007) é 4,19 KJ.[Kg (L) K]}^{-1}$$

$$T_p = \text{temperatura da água purgada (K)}$$

$$T_{Ref} = \text{temperatura da água de alimentação (K)}$$

Perdas associadas à temperatura das cinzas

As perdas associadas às cinzas foram calculadas de acordo com a seguinte equação:

$$P_{TC} = Q_{m\text{ cinza}} \cdot 1170$$

Onde:

$$P_{TC} = \text{perdas associadas à temperatura das cinzas (KJ.s}^{-1}\text{)}$$

$$Q_{m\text{ cinza}} = \text{vazão mássica de cinzas (Kg de cinza.s}^{-1}\text{)}$$

$$1.170 = \text{valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas [KJ.(Kg de cinza)}^{-1}\text{]}$$

A vazão mássica de cinzas foi obtida a partir da vazão mássica de cavaco multiplicado por 0,015, que é um valor médio em massa de cinzas no cavaco, de 1,5%, calculado empiricamente através da análise de cinzas em forno mufla, a temperatura de 600 °C durante 3 (três) horas, e por consultas a metodologias.

$$Q_{m\text{ cinza}} = Q_{mc} \cdot 0,015$$

Onde:

$Q_{m\text{ cinza}}$ = vazão mássica de cinzas (Kg de cinza.s⁻¹)

Q_{mC} = vazão mássica de cavaco (Kg de cavaco.s⁻¹)

Perdas por combustível não convertido presente nas cinzas

As perdas por combustível não convertido foram realizadas de acordo com o teor de carbono nas cinzas, calculado a partir da seguinte equação:

$$P_{CC} = m_C \cdot 33780 \cdot Q_{m\text{ cinza}}$$

Onde:

P_{CC} = perdas por combustível não convertido presente nas cinzas (KJ.s⁻¹)

m_C = massa de carbono presente nas cinzas [Kg de carbono.(Kg de cinza)⁻¹]

33780 = poder calorífico do carbono [KJ.(Kg de carbono)⁻¹]

Q_{mc} = vazão mássica de combustível (Kg.s⁻¹)

A massa de carbono nas cinzas foi calculada a partir do processo de peneiramento das cinzas retiradas da caldeira onde os grãos de carvão tinham granulometria maior que os das cinzas sendo separados, e pesados de acordo com a seguinte equação.

$$m_C = m_{\text{carvão}} \cdot 0,8020$$

Onde:

$m_{\text{carvão}}$ = massa de carvão presente nas cinzas [Kg carvão.(Kg de cinza)⁻¹]

0,8020 = teor de carbono no carvão de acordo com Machado e Andrade (2004)

Perdas totais

As perdas totais é a soma de todas as perdas de acordo com a seguinte equação:

$$P_T = P_{CH} + P_{RC} + P_P + P_{TC} + P_{CC}$$

Onde:

P_T = perdas totais (KJ.s^{-1})

P_{CH} = perdas pela chaminé (KJ.s^{-1})

P_{RC} = perdas por radiação e convecção (KJ.s^{-1})

P_P = perdas por purga (KJ.s^{-1})

P_{TC} = perdas associadas a temperatura das cinzas (KJ.s^{-1})

P_{CC} = perdas por combustível não convertido (KJ.s^{-1})

Calculo da eficiência energética do gerador de vapor

O cálculo da eficiência é dado pela diferença do poder calórico fornecido pelo combustível e das perdas totais.

$$Ef. = \frac{Q_{Cal.Comb.} - P_T}{Q_{Cal.Comb.}} \cdot 100$$

Onde:

$Ef.$ = eficiência do gerador de vapor (%)

$Q_{Cal. Comb.}$ = vazão calorífica de combustível (KJ.s^{-1})

P_T = perdas totais (KJ.s^{-1})

Sendo que a vazão calorífica de combustível foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{Cal.Comb.} = PCI \cdot Q_{mc}$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior do combustível [$\text{KJ} \cdot (\text{Kg de combustível})^{-1}$]

Q_{mc} = vazão mássica de combustível ($\text{Kg de combustível.s}^{-1}$)

Considerando ainda que o poder calorífico do combustível foi calculado levando-se em consideração as características do combustível, sendo neste caso usado o Poder Calorífico

Inferior (PCI) do combustível, visto que a água presente nos produtos da combustão, encontram-se em estado de vapor, de acordo com a equação abaixo, adaptada de José (2004):

$$PCI = \left[8.100.C + 34.400.\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2.500.S - 600.w \right] . 4,184$$

$$w = 9.H + u$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior (KJ)

C = teor de carbono [Kg de C.(Kg de combustível)⁻¹]

H = teor de hidrogênio [Kg de H.(Kg de combustível)⁻¹]

O = teor de oxigênio [Kg de O.(Kg de combustível)⁻¹]

S = teor de enxofre [Kg de S.(Kg de combustível)⁻¹]

w = água formada nos produtos [Kg de água.(Kg de combustível)⁻¹]

u = umidade do combustível [Kg de água.(Kg de combustível)⁻¹]

Considerando que o principal combustível utilizado neste estudo é de cavaco feito com madeira de eucalipto então a equação fica de acordo com Barcelos (2006):

$$PCI = \left[8.100.0,49 + 34.400.\left(0,0487 - \frac{0,4379}{8}\right) + 2.500.0,0001 - 600.w \right] . 4,184$$

$$w = 9.0,0487 + u$$

Resultados e discussão

Perdas pela chaminé

Os valores das perdas foram calculados com auxílio de planilhas no programa Excel e podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros referentes às perdas pela chaminé

Perdas (KJ.s ⁻¹)	Amostragens						Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
Gases secos	762,19	652,82	667,02	455,45	616,99	627,88	630,39
Vapor na chaminé	1.575,18	969,81	1.254,54	1.279,67	456,53	317,22	975,49
Queima incompleta	251,42	115,09	223,14	130,41	163,18	97,77	163,50
Totais pela chaminé	2.588,79	1.737,72	2.144,70	1.865,53	1.236,70	1.042,87	1.769,38

Os dados mostram que as maiores perdas ocorreram na primeira amostragem, devido principalmente a alta umidade do cavaco, que conseqüentemente provocou uma alta na concentração de monóxido de carbono, maior quantidade de vapor na chaminé, e ainda a baixa temperatura ambiente no momento da amostragem que aumentou as perdas por gases secos.

Consideramos também que as menores perdas ocorreram na sexta amostragem, devido ao cavaco apresentar a menor umidade de todas as amostragens e também pela temperatura ambiente ser mais alta que a da primeira amostragem. A figura 1 representa a variação das perdas em cada amostragem.

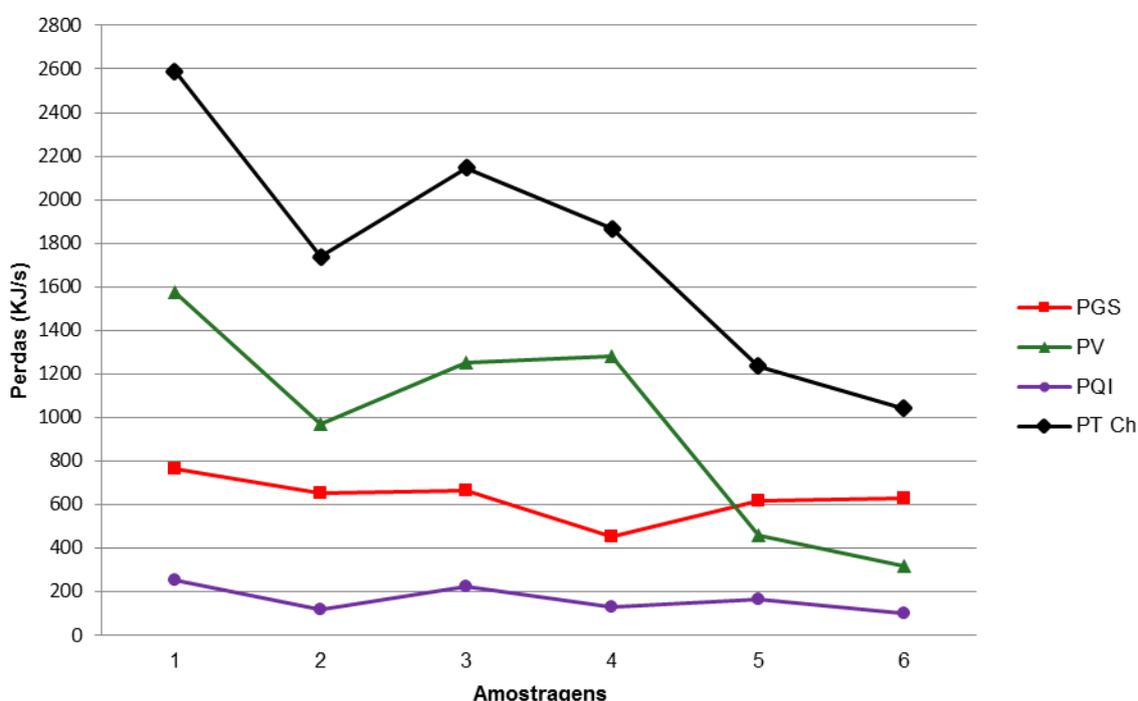


Figura 1. Variações das perdas pela chaminé onde: PGS – perdas por gases secos; PV – perdas por vapor presente na chaminé; PQI – perdas por queima incompleta do combustível; e PT Ch – perdas totais pela chaminé.

Pode-se observar uma redução significativa nas perdas, ao longo dos dias em que as amostragens foram realizadas, devido ao fato de a empresa receber cavaco comprado de terceiros, com alto teor de umidade neste primeiro dia de amostragem, que foi gradativamente substituído por lenha do estoque na segunda amostragem. Já a terceiro e quarto dia de amostragem houve novamente um aumento das perdas por vapor na chaminé, devido novamente a compra de novas cargas de cavaco com alto teor de umidade. Na quinta amostragem se observam que apesar de a umidade ter sido reduzida significativamente as

perdas por queima incompleta aumentaram devido ao aumento de injeção de ar que consequentemente aumentaram as perdas por gases secos na chaminé. Como observação geral do gráfico da figura 1, é possível de concluir que o aumento da injeção de ar na fornalha aumenta com maior significância a queima incompleta do cavaco do que a umidade deste combustível.

Analisando-se estatisticamente podemos observar um desvio padrão, ou seja, uma dispersão das perdas caloríficas em torno da média, de $571,68 \text{ KJ.s}^{-1}$, que determina um coeficiente de variação 32,31%, considerado de alta dispersão, segundo Gomes (1990). Indicando grande influência da temperatura ambiente e umidade do cavaco, nas perdas, pois, foram os fatores, observados, que variaram com as perdas nas seis amostragens.

Perdas por radiação e convecção

Tabela 4. Parâmetros referentes às perdas por radiação e convecção

Amostragens	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
Perdas (KJ.s^{-1})							
Radiação e convecção	67,56	60,75	56,07	55,03	62,65	58,57	60,10

Os dados mostram que as variações das perdas por radiação e convecção são baixas, sendo a maior perda obtida na primeira amostragem e a menor na quarta amostragem, demonstrando uma variação de apenas 22,77% do menor para o maior valor. Apresentando a característica de maiores perdas no inverno visto a baixa temperatura média do ambiente facilita a dissipação da radiação bem como no aumento das correntes de convecção. Os valores das perdas podem ser observados na figura 2.

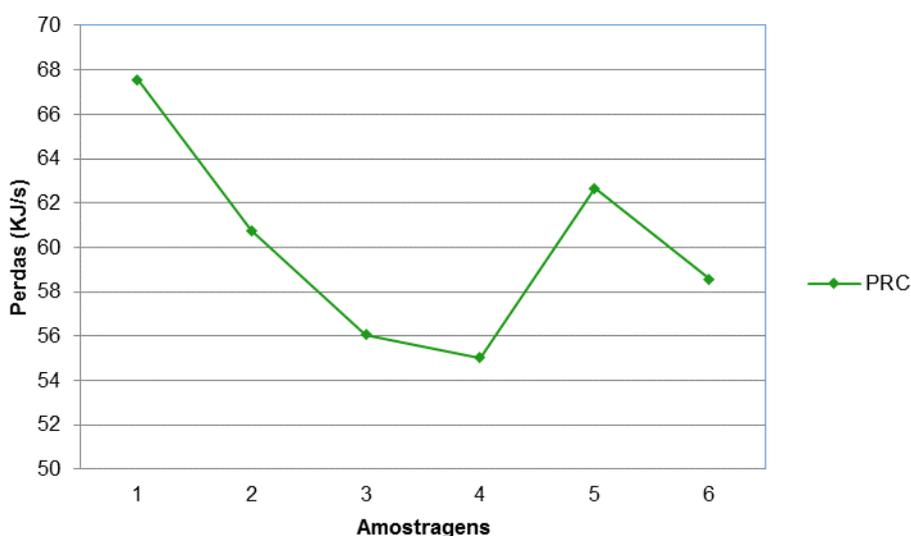


Figura 2. Variações das perdas por radiação e convecção.

As perdas por radiação e convecção estão intimamente ligadas às características de isolamento térmico do sistema, que possibilitam as perdas de calor do interior das estruturas de geração e transferência de calor, forçando um maior consumo de combustível para se alcançar a mesma produção de vapor. Nesta análise é muito importante a verificação do tipo de material usado no isolamento de cada estrutura, bem como a qualidade de sua instalação, buscando sempre a maior eficiência na transferência de calor do combustível para o local onde este tipo de energia será utilizado no processo.

Perdas por purgas

Tabela 5. Parâmetros referentes às perdas por purga

Amostragens	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
Perdas (KJ.s ⁻¹)							
Purga	783,53	925,99	938,56	682,97	859,79	925,99	852,81

Os dados mostram que a maiores perdas ocorreram na amostragem 2 (dois) e 6 (seis) e a menor na amostragem 4 (quatro), verificando-se uma variação máxima de 35,58%, considerada baixa visto que o sistema apresenta baixa variação de volume de água de alimentação bem como da temperatura do vapor/água purgados, dependendo de uma variação maior do volume de água de alimentação. Apresentando nos meses de inverno maiores perdas por purga, visto que a temperatura média da água de alimentação varia significativamente de uma estação para a outra. A figura 3 mostra a variação das perdas por purga em cada amostragem.

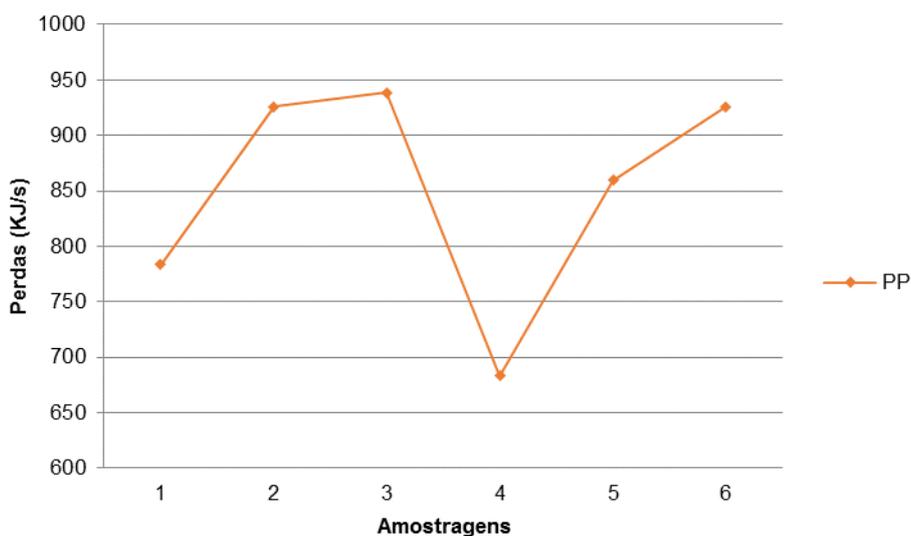


Figura 3. Variações das perdas por purga.

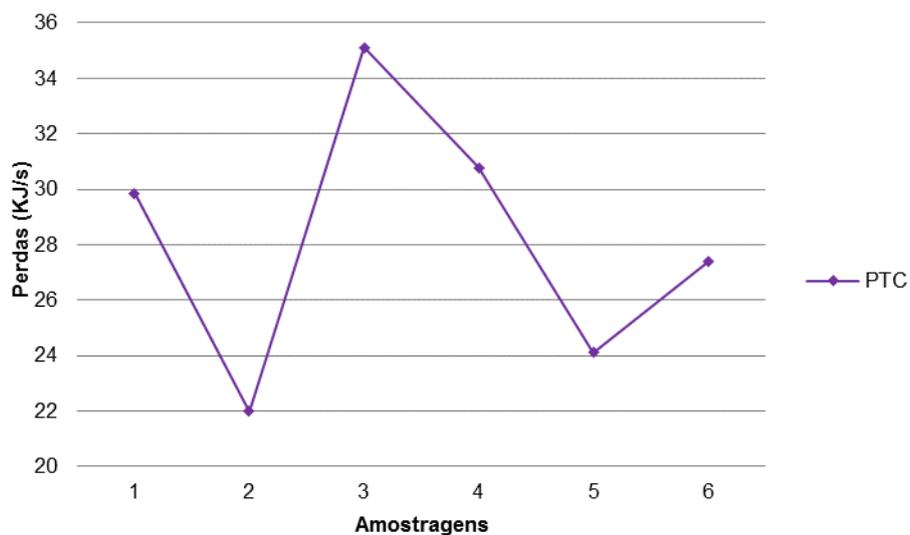
Pode ser observado que nas perdas por purga não ocorrem variações significativas, visto o procedimento de descargas de fundo ou purgas são realizados regularmente para manutenção de níveis toleráveis de sais de magnésio e cálcio, que causam incrustações nas tubulações de vapor. Outro fator que pode interferir na recuperação de energia e na eficiência deste sistema é a recuperação eficiente de condensados e um abrandamento adequado da água de alimentação, tendo em vista reduzir os níveis de magnésio e cálcio e consequentemente a frequência das descargas de fundo.

Perdas associadas à temperatura das cinzas

Tabela 6. Parâmetros referentes as perdas associadas a temperatura das cinzas

Amostragens	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
Perdas (KJ.s ⁻¹)							
Temperatura das cinzas	29,84	22,00	35,10	30,77	24,10	27,38	28,20

Observou-se nos resultados que as perdas são relativamente baixas quando comparadas as perdas analisadas anteriormente, observando-se nesta verificação que a terceira amostragem obteve as maiores perdas e a segunda as menores, tendo-se uma variação de 59,55% no resultado das menores para as maiores perdas. A figura 4, mostra que, apesar de serem pequenas as perdas as amostragens apresentaram grande variação entre seus resultados.

**Figura 4.** Variações das perdas associadas à temperatura das cinzas.

Bem como as perdas por purga, as perdas associadas à temperatura das cinzas é uma perda necessária visto que a tiragem de cinzas é um processo totalmente natural em geradores de vapor que utilizam combustíveis com grande quantidade de material mineral como a madeira, estas perdas estão ligadas diretamente a vazão de cavaco na alimentação da fornalha.

Perdas por combustível não convertido presente nas cinzas

Tabela 7. Parâmetros referentes às perdas por combustível não convertido presente nas cinzas

Amostragens	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
Perdas (KJ.s ⁻¹)							
Combustível não convertido	148,61	111,03	141,17	143,35	73,15	72,94	115,04

Os dados mostram nesta verificação de perdas uma maior variação dos valores, tendo as menores perdas obtidas na sexta amostragem e as maiores na primeira amostragem com uma variação de 103,74% do menor valor para o maior, sendo uma diferença bastante considerável. A figura 5 demonstra graficamente as variações das perdas pelo combustível não convertido.

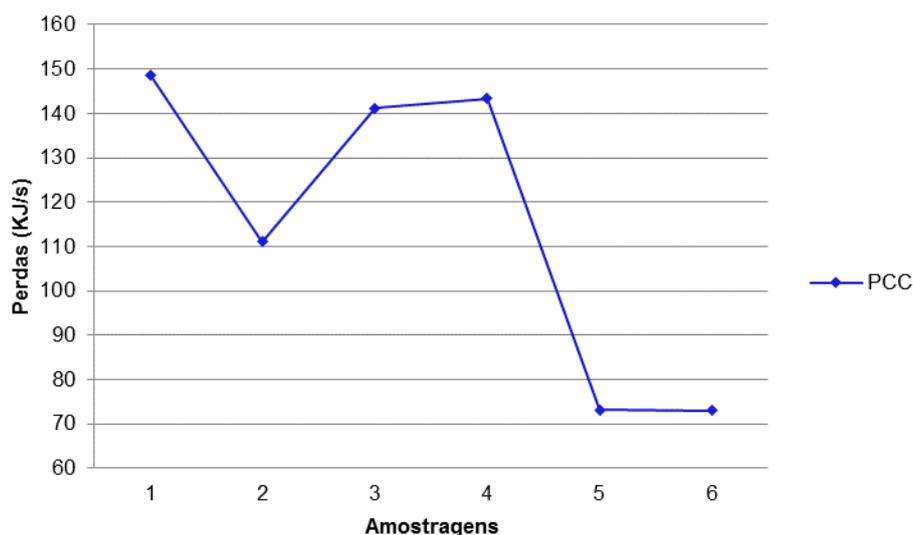


Figura 5. Variações das perdas por combustível não convertido presente nas cinzas.

Estas perdas estão mais intimamente ligadas à queima incompleta do cavaco, ocasionado por diversos motivos como a má regulagem da entrada de ar ou cavaco com excesso de umidade. Observa-se ainda, através dos gráficos, a ligação direta com as perdas pela chaminé, visto também que o excesso na entrada de ar pode carrear partículas de carvão sem queimar para o sistema de retenção de material particulado, composto por um multiciclone junto com as cinzas.

Perdas totais

A tabela 8 representa a contribuição de cada parâmetro analisado para o resultado das perdas totais.

Tabela 8. Análise das perdas totais

Perda analisadas	PCH	PRC	PP	PTC	PCC	PT
Quantidade (KJ.s ⁻¹)	1.769,38	60,10	852,81	28,20	115,04	2.825,53

Os resultados apresentam uma grande variação, sendo que as maiores perdas ocorrem pela chaminé com valor de 1.769,38 KJ.s⁻¹, valor este bastante elevado com relação às outras perdas, fator devido principalmente à umidade do cavaco, visto o grande gasto de energia para elevar a temperatura da água ambiente até a temperatura de aproximadamente 160 °C, a qual foi medida na chaminé. As perdas ocasionadas por gases secos, utilizados no processo de queima do cavaco, são devido ao fato de que aproximadamente 79% de toda a massa de ar é composta por gases que não reagem no processo, apenas carregam calor para a chaminé. Além disso, tem-se o excesso de ar aplicado para queima, motivado pela má regulagem de entrada de ar na fornalha.

Em contrapartida às perdas pela chaminé, as menores perdas observadas foram às associadas à temperatura das cinzas com valor de 28,20 KJ.s⁻¹, devido principalmente a baixa vazão mássica deste material, quando comparado com a vazão mássica de cavaco e a de entrada de ar para queima. A figura 6 representa a contribuição de cada tipo de perda com relação às perdas totais do sistema de geração de vapor.

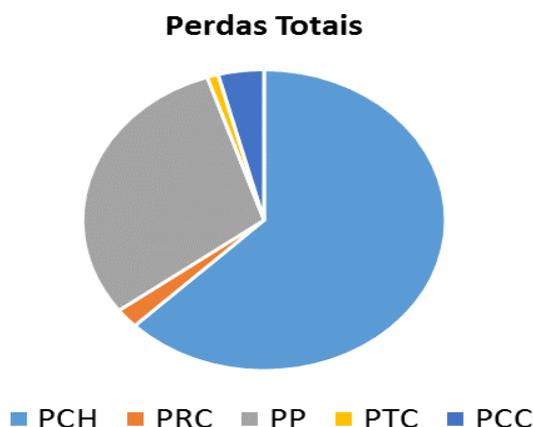


Figura 6. Contribuição de cada perda para as perdas totais onde: PCH – perdas pela chaminé, PRC – perdas por radiação e convecção, PP – perdas por purga, PTC – perdas pela temperatura das cinzas, PCC – perdas pelo combustível não convertido.

A representação gráfica demonstra que as perdas pela chaminé (PCH) são responsáveis por 62,62% das perdas totais, as perdas por radiação e convecção (PRC) por 2,13%, as perdas por purga (PP) por 30,18%, as perdas associadas à temperatura das cinzas (PTC) por 1,00% e as perdas por combustível não convertido presente nas cinzas (PCC) por 4,07%.

Eficiência energética do gerador de vapor

O cálculo de eficiência energética levou em consideração a quantidade de energia fornecida ao sistema através da alimentação do gerador de vapor por cavaco e as respectivas perdas calculadas anteriormente. Para o cálculo da eficiência foram utilizados valores médios de vazão mássica e umidade, este último usado para o cálculo do poder calorífico do cavaco, sendo que, os valores utilizados e os resultados obtidos podem ser verificados na tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros usados no cálculo da eficiência energética

Parâmetros	Valor
Umidade do cavaco (%)	33,94
Poder calorífico do cavaco (KJ.Kg ⁻¹)	13.786,03
Vazão mássica do cavaco (Kg.s ⁻¹)	1,56
Perdas totais (KJ.s ⁻¹)	2.825,53
Avaliação	Resultado
Eficiência energética do sistema (%)	86,86

O resultado da eficiência energética da caldeira analisada foi de 86,86% na geração de vapor, sendo que 13,14% de toda energia fornecida ao sistema corresponde a perdas no sistema. Entretanto, este resultado pode ainda ser melhorado.

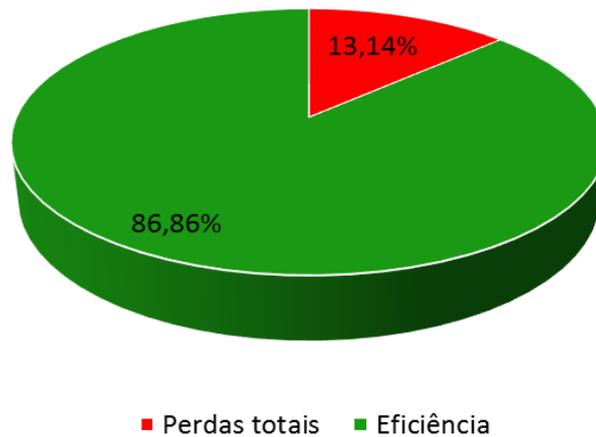


Figura 7. Representação gráfica da eficiência energética da caldeira.

A figura 7 representa graficamente a fatia de energia que é perdida pelo sistema dissipando-se no meio ambiente. O resultado da eficiência energética obtida para o sistema de geração de vapor analisado apresentou um resultado satisfatório, visto que segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005), os valores de eficiência para caldeiras aquotubulares ficam em torno de 80% a 85%, que é característico da caldeira avaliada. No entanto, este valor de eficiência do sistema analisado pode ser aumentado ainda mais, com ações conjuntas de operação e de melhorias nas instalações.

Conclusões

O rendimento energético na geração de vapor de um gerador de vapor envolve uma enorme dinâmica de ações que devem ser avaliadas detalhadamente, sendo que os parâmetros que causam maiores desperdícios devem ter maior atenção. O presente trabalho verificou que as perdas pela chaminé obtiveram os maiores valores de desperdícios de energia térmica, fator este suficiente para que ações de melhorias possam ser tomadas. No entanto, de nada vale a identificação do problema sem que ocorram mudanças de velhos paradigmas para que as melhorias ocorram.

A representatividade dos dados coletados em campo é o principal fator de confiabilidade dos resultados obtidos, para isso é necessária uma dinâmica organizacional bastante estruturada. Os dados coletados devem representar fielmente as condições normais de funcionamento do sistema sem a maquiagem de resultados.

Verificando a grande significância na contribuição de energia para o processo da empresa FOLEM, é de fundamental importância a avaliação destes resultados e estruturação e

implementação de ações de melhorias, visto que pequenas mudanças podem causar grandes impactos positivos, tanto econômicos quanto ambientais, melhorando a qualidade de seus processos.

Agradecimentos

Agradeço a Empresa FOLEM Indústria e Comércio, pela disponibilidade de acesso para o estudo, bem como, pelo uso das instalações de laboratório para realização das análises complementares a este estudo.

Referências

BARCELOS, D. C. et al. **O Estado-da-Arte da Qualidade da Madeira de Eucalipto para Produção de Energia: Um Enfoque nos Tratamentos Silviculturais**. Revista Biomassa & Energia. Rio de Janeiro: Renabio, v.2, n.2, p. 141-158, Jun. 2006.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI); ELETROBRÁS; PROCEL INDÚSTRIA. **Eficiência Energética na Indústria**. Brasília: CNI, 2009.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

GASPAR, C. **Eficiência Energética na Indústria**. Cursos de Utilização Racional de Energia, Agencia para a Energia – ADENE. Gaia, 2004.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15 ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

JOSÉ, H. J. **Combustão e Combustíveis** – Apostila Química Tecnológica Geral. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2004.

MACHADO, F. S.; ANDRADE, A. M. **Propriedades Termoquímicas dos finos de Carvão Vegetal e de Carvão Mineral, para a Injeção nas Ventaneiras de Altos-Fornos Siderúrgicos**. Revista Biomassa & Energia. Rio de Janeiro: Renabio, v. 1, n. 4, p. 353-363, Dez. 2004.

MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. 3. Ed. Itajubá, MG: FUPAI, 2006.

RERSNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física**, volume 2. Tradução Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, et al. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

RUSSEL, J. B., 1929. **Química Geral**, volume 1. Tradução e revisão técnica Márcia Guekezian, *et al.* 2 ed. São Paulo: Mackon Books, 1994.

Recebido para publicação em: 08/09/2014

Aceito para publicação em: 12/12/2014