

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA QUEIMA DE LODO FRIGORÍFICO EM UMA CALDEIRA À LENHA

Cristiano Meneghini*
Renan Fabrício Proinelli**

Resumo

A indústria frigorífica gera grande quantidade de resíduos em seus processos produtivos, entre eles estão os efluentes líquidos, que possuem alta concentração de poluentes e necessitam de tratamento adequado. O lodo frigorífico primário (LFP), matéria gerada a partir do tratamento de efluentes líquidos, possui alto custo de destinação em aterros sanitários e, por isso, tem seu potencial energético inutilizado, além de gerar subprodutos como metano e chorume. A queima do lodo primário em condições favoráveis pode contribuir significativamente na produção de energia térmica e elétrica. O presente estudo foi realizado em um frigorífico do Meio-oeste catarinense e teve como objetivo analisar a viabilidade econômica e técnica da potencial utilização de lodo frigorífico primário como fonte de energia, por meio da co-combustão em uma caldeira à lenha, respeitando as leis ambientais pertinentes. Para a obtenção dos resultados, foram necessários levantamento experimental das massas de combustíveis, entalpias e análise química elementar (CNHS) e aproximada do lodo primário para determinar seu poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). Também, foram analisados os valores de emissões gasosas e os custos envolvidos. Em relação aos resultados obtidos, concluiu-se que a caldeira em estudo apresenta um rendimento de 76%. Além disso, pode ser determinado que o lodo frigorífico não deve ser queimado em percentuais acima de 15% em relação de massa, sendo essa relação ideal para queima. Relacionado à viabilidade econômica do estudo, foi possível estimar o tempo de retorno do investimento com o secador rotativo de lodo em nove meses.

Palavras-chave: Lodo frigorífico. Caldeira. Balanço energético.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos provenientes de processos de tratamento de efluentes industriais e sanitários é uma questão de grande relevância na agenda ambiental da maioria dos países. Nesse cenário de grande urgência mundial, vários estudos estão sendo desenvolvidos a respeito da gestão alternativa do lodo industrial, entre eles está o emprego dele como fonte energética em caldeiras, por exemplo.

Os resíduos frigoríficos gerados pelo tratamento de efluentes, provenientes dos processos de matança de frangos e suínos e industrialização de carnes da unidade fabril em estudo, possuem altos custos de destinação; o uso de aterros sanitários está com os dias contados, em razão da aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n. 12.305), que restringe a utilização de aterros sanitários para resíduos últimos, ou seja, que não são passíveis de reúso ou reciclagem.

Este trabalho visa ao estudo da viabilidade técnica e econômica da aplicação do lodo frigorífico como fonte de energia, por meio da sua co-combustão na caldeira, considerando as leis ambientais em vigor, respeitando a emissão de gases poluentes e a destinação de resíduos sólidos. Serão avaliados, também, os impactos estruturais e operacionais que o lodo industrial pode causar na caldeira.

* Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; cristiano.meneghini@unoesc.edu.br

** Graduando de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; renann_p@hotmail.com

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CALDEIRAS E GERAÇÃO DE VAPOR

Caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos destinados à produção de vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia (SANTOS et al., 2006).

De acordo com Nogueira (2005), o mais importante gerador de vapor é a caldeira, que é, basicamente, um trocador de calor que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer. É constituída por diversos equipamentos integrados para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Essa definição abrange todos os tipos de caldeiras, as que vaporizam água, mercúrio ou outros fluidos e as que utilizam qualquer tipo de energia: térmica (seja convencional, como combustíveis, ou não convencional, como energia nuclear ou solar) ou, ainda, elétrica.

Os produtos da combustão na caldeira são tipicamente gasosos. Contudo, os elementos do combustível que não se oxidam ou já estão oxidados vão constituir as cinzas. Segundo Nogueira (2005), a energia térmica fornecida durante a queima dos combustíveis pode ser avaliada por seu poder calorífico, em geral, apresentado para sólidos e líquidos por unidade de massa e para gases por unidade de volume, referidas, nesse caso, a pressão atmosférica e a temperatura de 0 °C. Como comentado, a água, usualmente presente nos produtos de combustão, resultante da oxidação do hidrogênio, pode apresentar-se em diferentes estados (líquido e vapor). São definidos dois tipos de poder calorífico: o Poder Calorífico Superior (PCS), quando a água está na forma líquida, estado típico nas condições de ensaio de combustíveis, pouco aplicado em situações práticas, e Poder Calorífico Inferior (PCI), quando a água se apresenta como vapor, situação que efetivamente ocorre nos produtos de combustão nas chaminés.

2.2 DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS

A norma técnica NBR 10004, de 2004, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) classifica os resíduos sólidos em níveis diferentes de periculosidade, envolvendo a identificação do processo ou atividade que lhe originou, seus constituintes e características, assim considerando possíveis riscos ambientais e a saúde pública. Os lodos provenientes dos tratamentos de águas são caracterizados por essa norma como resíduos sólidos, portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios por ela definidos. A Resolução n. 357, de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) (BRASIL, 2005) determina condições que devem ser respeitadas acerca do lançamento de toda fonte poluidora, direta ou indiretamente nos corpos de água. Tais condições impedem o lançamento, sem tratamento prévio, do lodo produzido nas estações de tratamento de água, em decorrência da grande concentração de sólidos sedimentáveis presentes nesse resíduo. Contudo, essa legislação exige maiores cuidados com a disposição do lodo e o tratamento da água, gerando altos custos, tornando cada vez mais justificável a minimização de descartes. A Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos que restringe a utilização de aterros sanitários para resíduos últimos, ou seja, que não são passíveis de reuso ou reciclagem.

2.2 BALANÇO ENERGÉTICO

Segundo Bazzo (1995), toda análise energética é fundamental para garantir um bom controle do equipamento e da energia liberada pelo processo de combustão. Uma avaliação completa da energia envolvida no processo deve considerar todo o calor gerado no interior da fornalha, calor associado aos fluxos de massa, a ocorrência de combustão parcial e o calor perdido para o meio ambiente por condução, convecção e radiação.

O rendimento ou eficiência térmica de uma caldeira é determinado pela Equação 1,

$$\eta_T = \frac{mv \times (h_v - h_l)}{mcb \times PCI} \quad (1)$$

em que η é o rendimento térmico da caldeira, mv vazão mássica de vapor, h_{va} entalpia de vapor saturado, h_a a entalpia da água de alimentação da caldeira, m_{cb} a vazão mássica do combustível e PCI o poder calorífico do combustível obtido de acordo com sua composição química.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de atingir os objetivos do estudo, foram coletados os dados para determinação da umidade da lenha e do lodo, PCI deles, densidade e vazão da lenha, pressão de trabalho, emissões gasosas e custos para a análise econômica. As etapas são listadas a seguir:

- a) para a determinação da umidade da lenha e do lodo frigorífico, foram coletadas cinco amostras, obtendo-se sua umidade média;
- b) para a determinação do PCI da lenha, considerou-se sua umidade média, sendo seu valor determinado por interpolação;
- c) para a determinação do PCI do lodo frigorífico, três amostras foram enviadas para o laboratório A3Q;
- d) para a determinação da densidade da lenha, foram pesados trinta caminhões de lenha, cada um deles com um volume de 35 m³, obtendo-se uma densidade média;
- e) para a determinação da vazão mássica da lenha, foi multiplicado o volume consumido (baseado em tabelas de monitoramentos já existentes) pela densidade da lenha;
- f) para a determinação da emissão de poluentes gasosos no processo de combustão da lenha e da mistura de lodo e lenha, usou-se o aparelho de medição de gases Texto 335;
- g) para a determinação dos custos foram monitorados processos e analisados históricos pertinentes;
- h) para determinar os valores de matérias-primas e a depreciação dos equipamentos, utilizou-se o *software SAP ERP (Enterprise Resource Planning)*;
- i) para a definição do tempo de retorno do investimento inicial, utilizou-se o método do *payback* não descontado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

A principal biomassa utilizada para geração de energia na caldeira em estudo é a lenha em pedaços de um metro, geralmente de eucalipto. A unidade tem capacidade de produção de co-combustíveis renováveis, como o óleo líquido e o lodo primário, gerados a partir dos resíduos frigoríficos. O Lodo Frigorífico Primário (LFP) é a biomassa obtida a partir de tratamento físico-químico (tratamento primário) de efluentes frigoríficos.

O processo de secagem tem o intuito de reduzir a umidade do lodo a teores de 10 a 15% de umidade; a combustão dele nesse processo é indesejável, porque além de aumentar o percentual de cinzas há perda de poder calorífico do lodo. O processo apresenta uma baixa emissão de monóxido de carbono (CO), porém exaure forte odor. O odor e as impurezas do ar são reduzidas com a utilização do processo de biofiltragem.

4.2 ANÁLISE ELEMENTAR E IMEDIATA DO LODO FRIGORÍFICO

Em razão da grande urgência em relação à destinação adequada de resíduos sólidos, em virtude das restrições sanitárias e do alto custo para destinação, o emprego do Lodo Frigorífico Primário (LFP) como fonte energética por meio da combustão na caldeira aparenta ser uma solução atrativa. Porém, para viabilizar o estudo dessa aplicação, é necessária a obtenção da análise elementar, imediata e poder calorífico de amostras do lodo primário, as quais serão apresentadas na sequência. Foram coletadas três amostras de LFP em condições normais de operação do tratamento de efluentes, sem que houvesse a presença de chuva, pois segue junto à linha de efluentes, diminuindo a concentração de sólidos dissolvidos na água, alterando as características normais do lodo obtido posteriormente no processo de flotação.

A Tabela 1, apresenta as propriedades do lodo obtidas a partir das amostras de lodo em base seca, coletadas em condições de operação normais.

4.3 TESTES DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Os testes com uso de lodo adicionado à lenha foram feitos com percentuais de 10, 15 e 20% de lodo em relação à massa total de lenha consumida por hora; esses testes buscam determinar o percentual máximo de lodo que pode ser queimado na caldeira, em relação à lenha em períodos intermitentes, e não expressam o possível consumo contínuo de lodo, em razão da produção diária de lodo atingir somente 6% da massa total de lenha consumida diariamente. A dosagem foi controlada com base na frequência no inversor de frequência a fim de garantir a precisão da dosagem. Os testes foram efetuados com a caldeira em condições de operações normais em horas diferentes do dia, no período de quatro dias.

Tabela 1 – Análise do lodo frigorífico

Análise imediata	
Resíduo mineral fixo (cinzas) (%)	17,51
Sólidos voláteis (%)	64,22
Sólidos totais (%)	81,74
Umidade (%)	12,80
Análise elementar	
Carbono (%)	31,50
Oxigênio (%)	18,60
Hidrogênio (%)	11,50
Nitrogênio (%)	11,50
Enxofre (%)	0,310
Poder calorífico	
Poder calorífico inferior (kcal/kg)	4310
Poder calorífico superior (kcal/kg)	4800

Fonte: os autores.

Durante a queima, foram analisados os níveis de emissões gasosas, a fim de respeitar os níveis máximos permitidos pela legislação. Os resíduos sólidos gerados pela combustão (cinzas) foram observados quanto à quantidade e ao estado em que se encontram. De acordo com as características finais das cinzas, a queima pode danificar a estrutura da caldeira, baixando sua eficiência e causando problemas operacionais. As características iniciais do lodo também devem ser consideradas, pois se o lodo estiver “queimado” (quando sai do secador), mesmo não tem efeito nenhum no balanço térmico.

A relação de eficiência energética da caldeira foi obtida por meio de cálculo e comparada com os valores obtidos pelo aparelho de medição Testo 335. O poder calorífico inferior (PCI) utilizado para o cálculo da eficiência energética, foi obtido por intermédio do somatório dos percentuais de lodo e lenha, multiplicados pelos seus respectivos PCIs.

A nova massa de combustível para cada teste foi obtida marcando-se 4 m³ de lenha dispostos na esteira hidráulica e monitorando o tempo gasto para seu consumo na caldeira ao mesmo tempo em que é queimado o percentual determinado de lodo, posteriormente, somando suas respectivas massas.

4.4 TESTES DE COMBUSTÃO E BALANÇO ENERGÉTICO

Usando apenas lenhas em toras, o rendimento térmico da caldeira foi de 76%. O rendimento térmico calculado é válido para regimes de operação normal, valor esse aceitável para caldeiras à lenha em toras. A eficiência energética também foi obtida por meio de medições com o equipamento Testo 335, a fim de comparar os resultados obtidos por cálculo.

A Tabela 2 mostra os valores médios de eficiência térmica junto à emissão de gases e temperatura da chaminé, esses obtidos em quatro dias de testes em horas alternadas, o que está coerente, comparando-se com os valores dos cálculos.

Tabela 2 – Dados médios obtidos pelo aparelho Testo 335 queimando lenha

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (mg/m ³)	Excesso de ar (%)	Temperatura chaminé (°C)	Eficiência (%)
7,06	11,93	103,28	63,50	185,21	77,17

Fonte: os autores.

4.4.1 Teste de combustão de lenha em toras com 10% de LFP

Para o cálculo do rendimento térmico com 10% de lodo frigorífico, considerou-se a mesma vazão de vapor, temperaturas e pressões para a obtenção das entalpias usadas no cálculo aplicado para eficiência com apenas lenha em toras.

Logo, o rendimento térmico da caldeira usando como combustível a biomassa de lenha em toras junto a um percentual de massa de 10% de LFP correspondeu a 79%.

Pode ser observado que, com a dosagem de 10% de lodo, obteve-se uma redução significativa de 11,2% no consumo de combustível (lenha e lodo).

A Tabela 3 mostra os valores da média de quatro dias coletados pelas medições, os quais podem ser comparados aos obtidos por cálculo, que mais uma vez apontou boa comparação da eficiência.

Tabela 3 – Dados médios obtidos pelo aparelho Testo 335 queimando lenha e 10% de LFP

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (mg/m ³)	Excesso de ar (%)	Temperatura chaminé (°C)	Eficiência (%)
7,69	11,33	821,83	71,94	189,33	80,38

Fonte: os autores.

A queima de lodo junto à lenha aumentou significativamente a quantidade de cinzas na semana de testes, o que representou 25% a mais de cinzas, isso em razão de o teor de cinzas presente no lodo ser superior ao da lenha, essa variação obtida será semelhante nos estudos com percentuais maiores de lodo, pois a quantidade total queimada semanalmente é praticamente a mesma, variando apenas a quantidade percentual dosada em determinados períodos do dia, conforme a necessidade. A queima do lodo favorece ainda a ocorrência de formação de depósitos e incrustações nas paredes da fornalha, o que pode vir a interferir na troca térmica. A concentração de monóxido de carbono (CO) medida está abaixo do valor máximo estabelecido pela norma do Conama, por meio da Resolução n. 382, de 26 de dezembro de 2006, que é de 1300 mg/Nm³. Pode-se, assim, afirmar que pode ser queimado um total de 10% de lodo em relação à massa de lenha, respeitando o valor de emissão gasosa exigido.

4.4.2 Teste de combustão de lenha em toras com 15% de LFP e cálculo de balanço energético

Assim como no cálculo anterior, foram mantidos os mesmos valores de massa de vapor e entalpias para o cálculo com 15% de lodo frigorífico em relação de massa. Com base nos testes, o rendimento térmico ou a eficiência da caldeira, usando-se como combustível a biomassa de lenha em toras junto a um percentual de massa de 15% de LFP correspondeu a 81%. Com isso, observou-se que ao ser dosado lodo junto à lenha, no percentual de 15%, obteve-se uma redução de 17,6% no consumo de combustível.

A Tabela 4 denota os valores médios coletados pelas medições, os quais podem ser comparados aos valores obtidos por cálculo:

Tabela 4 – Dados médios obtidos pelo aparelho Testo 355 queimando lenha e 15% de LFP

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (mg/m ³)	Excesso de ar (%)	Temperatura chaminé (°C)	Eficiência (%)
8,31	11,58	1084,00	70,74	189,15	82,74

Fonte: os autores.

Observou-se nos resultados apresentados que até 15% de LFP pode ser utilizado na caldeira em conjunto com a lenha em toras, atendendo os valores permitidos de CO. Além disso, o estudo demonstra que a eficiência da caldeira aumenta, o que é consequência da redução do consumo de combustível em relação ao aumento do PCI dos combustíveis. A quantidade de cinzas geradas pela combustão do lodo e lenha ficou delimitada pela quantidade de lodo gerado diariamente na unidade, tendo valores semelhantes ao teste anterior.

Assim, pode-se determinar a mistura LFP com teor de 15% ideal para a queima, listando-se os principais benefícios: baixo impacto estrutural, aumento da eficiência energética da caldeira, redução no consumo de combustível e emissão de CO dentro dos padrões determinados pela legislação ambiental.

4.4.3 Teste de combustão de lenha em toras com 20% de LFP

Para o cálculo do rendimento térmico com 20% de lodo frigorífico primário, manteve-se a mesma vazão de vapor, temperaturas e pressões para a obtenção das entalpias usadas no cálculo aplicado para eficiência com apenas lenha em toras. Assim, o rendimento térmico da caldeira em condições de operação normais, usando como combustível a biomassa de lenha em toras junto a um percentual de massa de 20% de LFP corresponde a 84%, tendo uma redução de 23,7% no consumo de combustível.

Os testes usando o aparelho Testo 335 seguem o mesmo padrão de coleta de dados estabelecido anteriormente, porém, a pedido do setor ambiental da empresa, apenas um dia de queima foi monitorado, em decorrência do valor de emissão de CO extrapolar o máximo permitido por lei, tendo seus valores médios expressos na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados médios obtidos pelo aparelho Testo 355 queimando lenha e 20% de LFP

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	Excesso de ar (%)	Temperatura chaminé (°C)	Eficiência (%)
8,97	12,10	1926,00	67,00	192,73	86,70

Fonte: os autores.

No entanto, pode-se observar que a queima de LFP com teor de 20% é inviável do ponto de vista ambiental, pois a concentração de CO é superior à permitida. Assim, não foram levantados dados aprofundados a respeito de incrustações geradas pela queima e qualidade das cinzas e demais parâmetros qualitativos.

4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para facilitar a identificação do tempo de retorno de investimento inicial (valor gasto na aquisição do secador rotativo), foi adotado o método do *payback* não descontado, o qual não considera a taxa juros, sendo um meio simples e de fácil compreensão para análise de investimentos. Fez-se a análise dividindo o valor de implantação do secador rotativo pelo benefício obtido mensalmente, determinando-se o tempo necessário para que os benefícios se igualem ao investimento.

O tempo de retorno do investimento foi de nove meses; após esse período, o equipamento trará um benefício mensal de R\$ 144.590,81, nos próximos dez anos de vida útil do secador, considerando a depreciação do equipamento fornecida pelo *software SAP ERP*.

5 CONCLUSÃO

Em relação às conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, podem ser referentes ao emprego do LFP como fonte de energia, ao ponto ótimo de queima quanto a índices de emissão de poluentes e à viabilidade da implantação do secador de lodo para a posterior queima em caldeiras.

No que se diz respeito ao emprego do LFP como fonte de energia térmica a partir da co-combustão, ele mostrou-se eficiente, resultado esse já esperado desde a obtenção de seu elevado poder calorífico, favorecendo, assim, a produção de vapor, aliado a uma significativa redução no consumo do combustível principal. De acordo com os testes realizados, observou-se, também, que quanto maior a porcentagem de lodo misturado à lenha, maior é a ocorrência de problemas relacionados à fusão das cinzas e corrosão, afetando a estrutura da caldeira.

Em análise à emissão de poluentes gasosos gerados pela combustão de LFP, ficou notável que se deve delimitar percentuais ideais de lodo para a queima, balanceando ganho de eficiência energética e emissão de poluentes atmosféricos, a fim de respeitar as leis ambientais vigentes no país.

A respeito da viabilidade da instalação do secador rotativo de lodo no pátio fabril da unidade, obteve-se um retorno positivo do investimento, sendo a instalação recomendada em outras unidades com condição de geração e tratamento de efluentes semelhantes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio Janeiro, 2004.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. Resolução n. 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 nov. 2002.

NOGUEIRA, L. A. H. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. 3. ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

