VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE LODO DE ETE INDUSTRIAL ATRAVÉS DA INCINERAÇÃO – CASE CETREL

Mariana Ferreira Santos[(1)]
Mestre em Energia, Bacharel em Química e Especialista em Resíduos na Cetrel. Atua há mais de 15 anos na área ambiental, com experiência em tratamento térmico de resíduos perigosos, valorização energética, gestão de processos e desenvolvimento de soluções técnicas para a indústria, com foco em segurança operacional, conformidade ambiental e inovação.
Geovana Miranda Teixeira[(2)]
Engenheira Química, atuando como Engenheira de Processo na Cetrel.
Claudia Martins Ferreira[(n)]
Engenheira Química, atuando como Gerente de Processos e Projetos na Cetrel.

Endereço[(1)]**:** Rua Oxigênio, 1099, Complexo Básico – Polo Petroquímico - Camaçari - Bahia - CEP: 42810-270 - Brasil - Tel: +55 (71) 98233-5501 - e-mail: marianasantos@cetrel.com.br.

RESUMO

O presente trabalho avaliou a viabilidade técnica da utilização do lodo industrial gerado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da CETREL como substituto energético parcial do gás natural no processo de incineração de resíduos perigosos. O estudo contemplou etapas de desaguamento mecânico, secagem manual em galpão e produção de blends energéticos contendo lodo e resíduos industriais organoclorados e líquidos calóricos. Após secagem natural, a umidade do lodo foi reduzida de aproximadamente 80% para valores próximos de 30%, permitindo sua aplicação como matriz energética complementar no incinerador. Os testes operacionais demonstraram adequada homogeneização do material nos blends, estabilidade operacional do forno e redução do consumo específico de gás natural. Também não foi observada formação significativa de escória associada ao uso do lodo. Os resultados obtidos evidenciam o potencial da valorização energética do lodo industrial como alternativa sustentável para redução do consumo de combustíveis fósseis e aumento da eficiência operacional do processo de incineração.

PALAVRAS-CHAVE: valorização energética, lodo industrial, combustível alternativo

INTRODUÇÃO

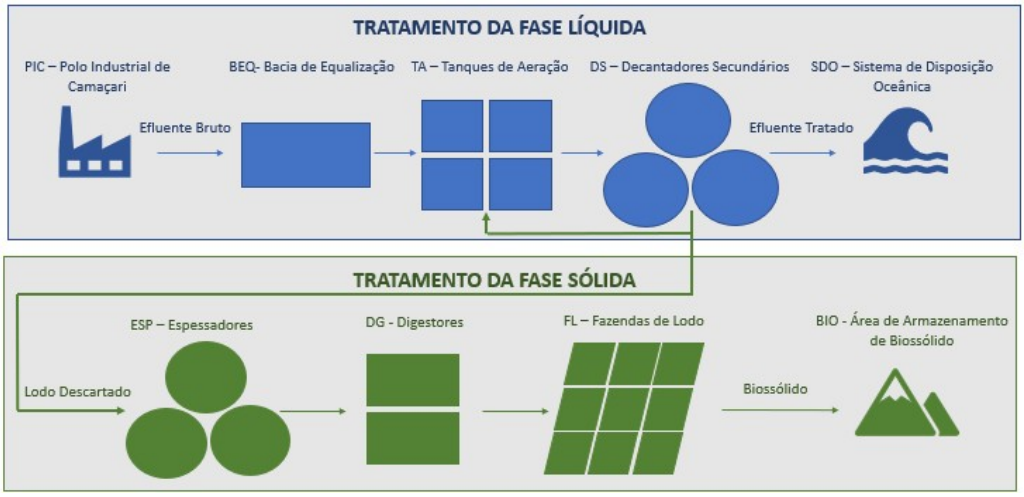
A CETREL S.A. possui mais de 30 anos de experiência no gerenciamento e tratamento de resíduos industriais perigosos, operando o maior parque de incineração de resíduos do Brasil. Localizada no Polo Industrial de Camaçari, na Bahia, a empresa atua como referência nacional em soluções ambientais para resíduos industriais, efluentes e emissões atmosféricas.

A Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da CETREL é responsável pelo tratamento dos efluentes industriais provenientes do Polo Industrial de Camaçari, operando através de sistema biológico de lodos ativados. A unidade possui capacidade operacional aproximada de 148 mil m³/dia, realizando remoção de carga orgânica, sólidos e compostos contaminantes provenientes de diferentes segmentos industriais.

Como resultado do processo biológico de tratamento, ocorre a geração contínua de lodo industrial, cuja gestão representa um dos principais desafios operacionais e ambientais associados ao sistema. Tradicionalmente, a destinação deste material demanda elevado tempo de processamento, dependência de condições climáticas e custos operacionais significativos. Na Figura 1 é ilustrado o atual processo de tratamento de efluentes e de gestão do lodo ativado.

O lodo é bombeado para os espessadores, segue para os digestores e posteriormente dispostos em fazendas de lodo para secagem solar e produção de biossólido. Atualmente o biossólido é armazenado e utilizado para fins paisagísticos e recuperação de áreas degradadas. A Cetrel entende que esse processo de secagem solar e produção do biossólido não realiza o aproveitamento do potencial energético que o lodo possui, por isso veem estudando constantemente alternativas para esse reaproveitamento.

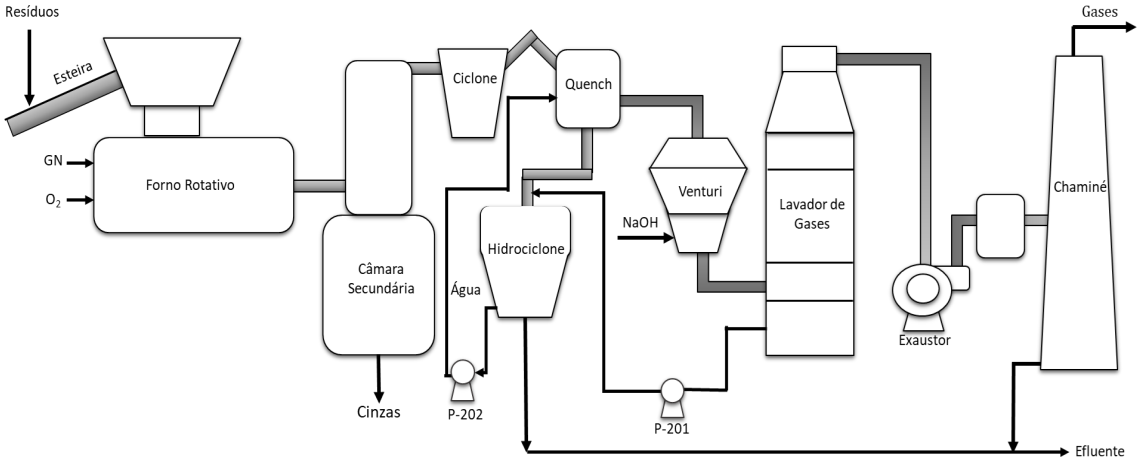
Figura 1 – Layout do Processo de Tratamento de Efluentes



Fonte: elaboração própria

Paralelamente, a Unidade de Incineração da CETREL possui elevada relevância estratégica para o gerenciamento de resíduos industriais perigosos, apresentando elevada flexibilidade operacional e capacidade para destruição térmica de ampla variedade de resíduos sólidos, líquidos e pastosos. O incinerador é específico para resíduos perigosos organoclorados e tem sua performance comprovada conforme os monitoramentos realizados definidos em licença operacional: de forma contínua e online é analisado CO, O_2, CO_2, NO_x e SO_2; quinzenalmente é analisado HCl; semestralmente material particulado e metais; e a cada dois anos é submetido a um teste de queima para análise de todos os parâmetros do CONAMA 316/02 incluindo dioxinas e furanos.
O sistema de incineração é composto por forno rotativo, câmara secundária de combustão e sistema de controle de poluição atmosférica, operando com elevada eficiência de destruição e remoção de compostos orgânicos perigosos.
O processo utiliza gás natural (GN) como combustível auxiliar para manutenção das temperaturas mínimas de operação, aquecimento e estabilização térmica do forno.
Os resíduos são alimentados no forno à granel e para que seja garantida a especificação adequada é necessário realizar homogeneização dos resíduos. Esse processo se chama blendagem e nessa etapa os resíduos semissólidos (pastosos) são misturados com uma matriz, seja ela um solo contaminado ou biomassa.
Apesar da elevada importância operacional da incineração de resíduos perigosos, o consumo de GN representa um dos principais impactos ambientais e econômicos associados ao processo, especialmente devido às emissões de gases de efeito estufa e ao elevado consumo de combustível fóssil.

Figura 2 – Layout do Processo de Incineração de Resíduos Sólidos



Fonte: elaboração própria

Neste contexto, a valorização energética de resíduos surge como alternativa estratégica para redução do consumo de combustíveis fósseis e aumento da sustentabilidade operacional. O reaproveitamento energético de resíduos consiste na utilização do potencial calorífico dos materiais como substitutos energéticos em processos térmicos industriais.
A CETREL já possuía experiência anterior na utilização de biomassa como matriz energética para otimização do consumo de GN no incinerador de resíduos sólidos, obtendo resultados positivos na redução de emissões e melhoria da eficiência energética do processo.
Com base nesse conceito, foi desenvolvido o presente estudo visando avaliar a utilização do lodo industrial gerado na ETE como matriz energética complementar no processo de incineração.
A proposta consistiu na realização de etapas de desaguamento e secagem do lodo, seguidas da sua utilização em blends energéticos juntamente com resíduos organoclorados e resíduos líquidos calóricos, buscando avaliar o comportamento operacional do material, sua capacidade de homogeneização, possíveis impactos na formação de escórias e o potencial de redução do consumo de gás natural.

OBJETIVO

Avaliar a viabilidade técnica da utilização do lodo industrial gerado na ETE da CETREL como substituto energético parcial do gás natural no processo de incineração de resíduos perigosos.

METODOLOGIA

Desaguamento do lodo
O lodo utilizado nos testes foi proveniente da ETE da CETREL, sendo inicialmente submetido a uma etapa de desaguamento mecânico por centrifugação, com o objetivo de reduzir sua umidade e aumentar a concentração de sólidos para viabilizar as etapas subsequentes de secagem e valorização energética.
O teste foi realizado por meio da instalação de um skid de centrifugação nas proximidades da Elevatória de Lodo Central (ELC) da ETE. O lodo espessado alimentado ao sistema apresentava aproximadamente 97% de umidade e teor médio de sólidos de 3,7%, sendo bombeado para a centrífuga após condicionamento químico com polímero catiônico.
Durante o processo, ocorreu a separação entre a fase sólida e líquida do lodo, produzindo uma torta desaguada destinada à secagem e um clarificado retornado ao processo de tratamento da ETE.
Os principais parâmetros avaliados durante os testes foram teor de sólidos da torta produzida, consumo de polímero, estabilidade operacional do equipamento e qualidade do clarificado. Os resultados obtidos permitiram validar tecnicamente o desaguamento mecânico como etapa preparatória para a utilização energética do lodo.
Embora o foco principal deste trabalho esteja relacionado à aplicação energética do lodo na incineração, a etapa de desaguamento mostrou-se fundamental para redução do volume transportado, melhoria das condições de manuseio e viabilização da secagem necessária ao aumento do potencial calorífico do material.

Secagem do lodo
Após o desaguamento mecânico, o lodo foi encaminhado para o galpão da Unidade de Incineração da CETREL, onde foi realizada secagem manual e natural do material.
O processo consistiu na disposição do lodo em leiras dentro do galpão e realização de revolvimento manual periódico, promovendo exposição ao ar e favorecendo a evaporação da água.
A secagem ocorreu ao tempo, sem utilização de sistema térmico dedicado, permitindo redução da umidade inicial de aproximadamente 80% para valores próximos de 30%.
Essa redução da umidade foi fundamental para aumento do potencial calorífico do material e viabilização da sua utilização como matriz energética complementar no incinerador.

Produção do blend energético
Após a secagem, foram realizados testes de produção de blend energético utilizando o lodo como matriz principal para incorporação de resíduos industriais. Para esse teste o lodo utilizado foi de 30% a 45% de umidade.
No primeiro teste foi utilizado blend contendo 60% de lodo seco e 40% de resíduo organoclorado pastoso.
No segundo teste foi utilizado blend contendo 60% de lodo seco e 40% de resíduo líquido calórico.
A proposta da blendagem foi avaliar a capacidade do lodo atuar como estruturante e matriz energética para resíduos com elevado poder calorífico e características operacionais complexas.

Durante a preparação dos blends foram avaliados aspectos relacionados à homogeneização, estabilidade física do material e capacidade de incorporação dos resíduos.

Teste de incineração

Os blends produzidos foram alimentados no incinerador de resíduos sólidos da CETREL durante período aproximado de uma semana.

Durante os testes operacionais foram monitorados os seguintes parâmetros:

- Consumo de gás natural;
- Formação de escória;
- Estabilidade operacional do forno;
- Comportamento do material durante alimentação;
- Homogeneização do blend;
- Aspectos operacionais relacionados à combustão;
- Monitoramento na chaminé de forma contínua os gases de combustão: O_2, CO, CO_2, SO_2, NOx;
- Monitoramento na chaminé através de coleta isocinética para os parâmetros: metais e compostos orgânicos voláteis, conforme Autorização Ambiental para realização do teste emitida pelo órgão ambiental;

  OBS.: Como o lodo foi classificado como resíduo não perigoso (Classe II) conforme a NBR 10.004 e, o incinerador é projetado e licenciado para resíduos perigosos organoclorados, não foi previsto incremento de riscos ambientais nas emissões atmosféricas. Portanto, a análise de demais parâmetros do CONAMA 316/02 como dioxinas e furanos e gases ácidos não fizeram parte do escopo desse estudo, uma vez que já são monitorados conforme plano de análises do incinerador.
- Índices técnicos do processo visando avaliar o potencial de substituição energética proporcionado pela utilização do lodo.

OBS.: Para efeito de análise desse estudo, os resultados do índice técnico do consumo de gás natural por tonelada incinerada (Nm^3/t) do blend produzido com o lodo foi comparado com o índice técnico histórico desse incinerador com o blend com outras matrizes (solo e biomassa).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Desaguamento do lodo

O principal objetivo do estudo foi avaliar a viabilidade da utilização do lodo industrial desaguado e seco como substituto energético parcial do gás natural no processo de incineração de resíduos sólidos industriais da CETREL.

O processo de desaguamento e secagem proporcionou melhora significativa das características físicas do lodo, permitindo sua utilização como matriz energética para incorporação de resíduos industriais com elevada complexidade operacional.

Antes da etapa de secagem, foi realizada a avaliação do desempenho do sistema de desaguamento mecânico por centrifugação. Os resultados demonstraram que a tecnologia foi capaz de elevar o teor médio de sólidos do lodo de aproximadamente 3,7% para 21,3%, produzindo uma torta com características adequadas para transporte, armazenamento e secagem posterior (Figura 03).

Figura 3 – Aspecto físico do lodo desaguado



Fonte: elaboração própria

Além da expressiva redução de volume do material, o desaguamento permitiu reduzir significativamente a quantidade de água a ser removida durante a secagem, contribuindo diretamente para a viabilidade operacional da rota de valorização energética estudada.

Durante os testes também foi observada influência da variabilidade do teor de sólidos do lodo de alimentação sobre o desempenho do processo e o consumo de polímero. Ainda assim, a centrífuga apresentou estabilidade operacional satisfatória e produção consistente de torta desaguada, demonstrando a adequação da tecnologia para aplicação em escala industrial.

Os resultados obtidos indicam que o desaguamento mecânico deve ser considerado uma etapa estratégica para a valorização energética do lodo, uma vez que reduz custos logísticos, melhora as condições de secagem e aumenta a eficiência global da rota de aproveitamento energético.

Os resultados analíticos da massa bruta do lodo desaguado estão apresentados na Tabela 1. Os resultados dos parâmetros compostos orgânicos voláteis (VOC) e compostos orgânicos semivoláteis (SVOC) que não estão presentes na Tabela 1 estiverem abaixo do limite de quantificação do método.

Os parâmetros analisados direcionaram os monitoramentos das emissões atmosféricas. Os resultados obtidos reforçam que as substâncias VOC, SVOC e metais estão em concentrações muito inferiores aos dos resíduos organoclorados já incinerados. Desta forma, confirmando a expectativa do lodo não incrementar riscos de emissões no processo de incineração.

Tabela 1 – Resultado da análise do lodo desaguado.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado
Metiletilcetona	µg/kg	199,2	3.125
1,2-Dicloroetano	µg/kg	10	445
1,1,2-Tricloroetano	µg/kg	10	346
Clorofórmio	µg/kg	10	45
Tolueno	µg/kg	10	40
Álcool terc-butílico	µg/kg	99,6	6.389
Estireno	µg/kg	10	62
Trihalometanos Total	µg/kg	10	45
Mercúrio	mg/kg	0,1	1,8
Cádmio Total	mg/kg	1	2
Cobalto Total	mg/kg	2	10
Cromo Total	mg/kg	2	40
Cobre Total	mg/kg	1	208
Manganês Total	mg/kg	2	186
Níquel Total	mg/kg	5	30
Chumbo Total	mg/kg	10	<10
Estanho Total	mg/kg	10	<10

Fonte: elaboração própria

Tabela 1. Continuação – Resultado da análise do lodo desaguado.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado
Estrôncio Total	mg/kg	5	492
Titânio Total	mg/kg	2	31
Tálio Total	mg/kg	10	<10
Vanádio Total	mg/kg	10	13
Arsênio Total	mg/kg	10	27
Antimônio Total	mg/kg	10	<10
Selênio Total	mg/kg	10	<10
Telúrio Total	mg/kg	10	<10

Fonte: elaboração própria

Secagem do lodo

Inicialmente, o lodo apresentava elevada umidade e baixa capacidade de incorporação de resíduos líquidos e pastosos. Após o processo de secagem natural realizado no galpão da Unidade de Incineração, o material passou a apresentar melhor estabilidade física, maior estruturação e aumento do potencial calorífico.

A redução da umidade para valores próximos de 45% permitiu não apenas melhoria do desempenho energético, mas também maior capacidade de absorção e homogeneização dos resíduos organoclorados utilizados na composição dos blends.

Outro ponto relevante observado foi a capacidade do lodo atuar simultaneamente como estruturante físico e matriz energética complementar, permitindo maior flexibilidade operacional na preparação dos blends.

Os ensaios laboratoriais complementares demonstraram forte correlação entre redução de umidade e aumento do Poder Calorífico Superior (PCS) do lodo.

O material com aproximadamente 54% de umidade apresentou PCS de 1.244 kcal/kg. Após etapas adicionais de secagem, foram obtidos valores de até 4.411 kcal/kg para umidade próxima de 3%, evidenciando elevado potencial energético do lodo após adequada redução de umidade (Tabela 2).

Tabela 2 – Relação entre redução da umidade e aumento do PCS do lodo seco.

Umidade (%)	PCS (Kcal/kg)
54	1.244
45	1.720
7	3.994
4	4.242
3	4.411

Fonte: elaboração própria

Quando comparado ao cenário anteriormente utilizado pela CETREL, baseado na utilização de solo contaminado como matriz de blend, o lodo apresentou vantagens operacionais relevantes. Além da redução significativa da quantidade de material inerte incorporado ao processo, houve maior potencial energético associado ao blend produzido.

A Figura 4 apresentam o aspecto físico do lodo após desaguamento e durante o processo de secagem realizado no galpão da Unidade de Incineração.

Figura 4 – Lodo em processo de secagem



Fonte: elaboração própria

Após o processo de secagem, o lodo apresentou características adequadas para incorporação ao blend energético utilizado na Unidade de Incineração. Durante os testes operacionais realizados foram avaliadas duas composições de blend contendo:

- 60% de lodo e 40% de resíduos organoclorado;
- 60% de lodo e 40% de resíduo de monômero não clorado.

Esse percentual foi definido empiricamente pela quantidade de resíduo pastoso que o lodo conseguiu estruturar para ser viável a alimentação no incinerador.
A referência operacional da proporção de blend para esse incinerador é:

- 70% de solo para 30% de resíduos ou;
- 50% de biomassa para 50% de resíduos.

O aspecto físico da biomassa e do lodo com umidade de 30% estão ilustrados nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Biomassa



Fonte: elaboração própria

Figura 6 – Lodo com umidade 30%



Fonte: elaboração própria

Na primeira etapa dos testes, foi avaliada a mistura entre lodo seco e lama de organoclorado, enquanto na segunda etapa foram utilizados resíduos de monômero não clorado. Em ambas as condições, o lodo apresentou

comportamento operacional satisfatório durante alimentação e combustão. Entretanto, durante os testes, observou-se que o lodo apresentava presença de grumos gelatinosos, ocasionando maior dificuldade de escoamento e leve redução da produtividade operacional. Ainda assim, o material apresentou capacidade adequada de incorporação ao blend energético, sem inviabilizar a operação. Os grumos formados podem estar associados ao polímero utilizado no processo de desaguamento do lodo, devido a sua textura gelatinosa (Figura 7). Esse fato foi o maior contribuinte para que o lodo não conseguisse absorver mais resíduo pastoso na produção do blend.

Figura 7 – Grumos no lodo seco



Fonte: elaboração própria

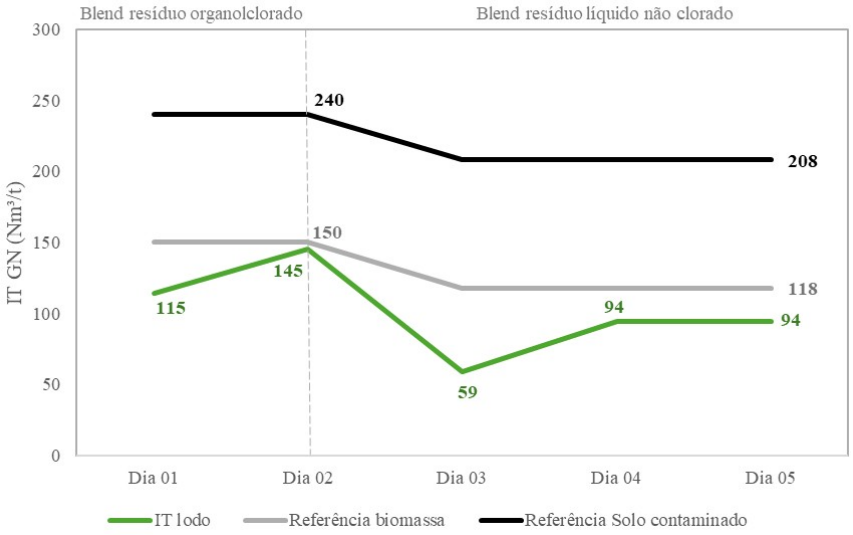
Os resultados demonstraram que foi possível promover adequada homogeneização do lodo como matriz de blend energético, permitindo sua alimentação no sistema de incineração e manutenção da estabilidade operacional do forno.
Outro aspecto relevante observado durante os testes foi o potencial de redução do consumo de gás natural da unidade. Os dados operacionais demonstraram redução significativa do índice técnico (IT) de gás natural quando comparados às condições de referência utilizando biomassa convencional e com solo (Tabela 3 e Figura 8).

Tabela 3 – Resultados obtidos no teste.

	Dia 01	**Dia 02**	**Dia 03**	**Dia 04**	**Dia 05**
Tipologia do Blend	lodo + resíduo organoclorado		lodo + resíduo de monômero não clorado		
Quantidade de resíduo (t)	4,92	4,07	5,35	3,27	3,35
Quantidade de lodo (t)	6,73	8,14	9,72	6,55	6,70
Blend (t)	11,65	12,21	15,07	9,82	10,05
Consumo GN (m^3)	1.334	1.772	888	925	949
IT GN (m^3/t)	115	145	59	94	94
Referência operacional blend biomassa + resíduo (Nm^3/t)	150	150	118	118	118
Referência operacional blend solo contaminado + resíduo (Nm^3/t)	240	240	208	208	208

Fonte: elaboração própria

Figura 8 – Gráfico do IT de consumo de gás natural



Fonte: elaboração própria

Considerando o custo médio do gás natural de R$ 3,48 por Nm³, os resultados obtidos demonstram potencial relevante de redução financeira associado à substituição parcial do GN pelo lodo.
Quando comparado ao cenário de referência utilizando solo contaminado, cujo índice técnico variava entre 208 e 240 Nm³/t, os testes com lodo apresentaram índices entre 59 e 145 Nm³/t.
Na condição de melhor desempenho operacional observada durante os testes, correspondente ao IT de 59 Nm³/t, a redução alcançada foi superior a 70% em relação à referência utilizando solo contaminado.
Considerando a diferença entre os índices técnicos de GN, a economia potencial estimada alcança aproximadamente R$ 518,52 por tonelada de resíduo incinerado quando comparado ao cenário de 208 Nm³/t, e aproximadamente R$ 629,88 por tonelada de resíduo incinerado quando comparado ao cenário de 240 Nm³/t.
Quando comparado à referência utilizando biomassa, cujo índice técnico variou entre 118 e 150 Nm³/t, os testes com lodo apresentaram índices entre 59 e 145 Nm³/t. Considerando a diferença entre os índices técnicos de GN e o custo médio de R$ 3,48 por Nm³, a economia estimada em relação à biomassa variou de R$ 17,40/t a R$ 205,32/t de blend incinerado, conforme o desempenho diário observado.
No melhor cenário operacional, correspondente ao IT de 59 Nm³/t, a economia em relação à referência de biomassa de 118 Nm³/t foi de 59 Nm³/t, equivalente a aproximadamente R$ 205,32 por tonelada incinerada. Em relação à referência de 150 Nm³/t, a diferença seria de 91 Nm³/t, equivalente a aproximadamente R$ 316,68 por tonelada incinerada.
Considerando o volume total de blend alimentado durante o teste, de aproximadamente 58,8 toneladas, o consumo real de GN foi de 5.868 Nm³. Caso fosse mantida a referência de biomassa para os mesmos dias operacionais, o consumo estimado seria de aproximadamente 7.702 Nm³. Dessa forma, a utilização do lodo representou economia de aproximadamente 1.834 Nm³ de GN no período, equivalente a cerca de R$ 6.382,04.
Esses resultados demonstram desempenho energético competitivo em relação à biomassa e reforçam o potencial do lodo como alternativa viável para reaproveitamento energético no processo de incineração.
Ressalta-se que nos testes realizados a umidade do lodo estava em entre 30% a 45%, caso o lodo apresente com uma umidade menor, o potencial de substituição energética será superior do que o encontrado nesses testes.

Emissões atmosféricas
Também foram monitorados aspectos relacionados às emissões atmosféricas de forma online: CO, CO_2, SO_2 e NO_x e estabilidade operacional do forno e comportamento do material na esteira de alimentação. Para o monitoramento atmosférico através da coleta de isocinética foi utilizado o blend do lodo com resíduo organoclorado. Os resultados apresentados não mostraram nenhuma alteração no padrão dessas emissões.
Em complemento, as análises de metais e EDR também não apresentaram desvios conforme o CONAMA 316/02 (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados das análises atmosféricas corrigidos à 7% de oxigênio.

Parâmetro	unidade	Resultado	Referência CONAMA 316/02
Substâncias inorgânicas classe I (somatório Hg, Cd, Tl)	mg/Nm³	0,01	0,28
Substâncias inorgânicas classe II (somatório Co, As, Ni, Se, Te)	mg/Nm³	0,07	1,4
Substâncias inorgânicas classe III (somatório Pb, Cr, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sn, Sb)	mg/Nm³	1,9	7,0
VOC total	mg/Nm³	8,4	-
EDR (VOC total)	%	99,999	99,99

Fonte: elaboração própria

Condições operacionais

Além dos ganhos energéticos, os testes demonstraram comportamento operacional satisfatório do material durante a combustão.

Diferentemente de uma das hipóteses inicialmente avaliadas, não foi observada formação significativa de escória durante a operação utilizando o lodo como matriz energética. Embora tenha sido identificado início pontual de formação de escória em condição específica contendo resíduos de elevado poder calorífico, o fenômeno não persistiu quando o sistema passou a operar apenas com o lodo, indicando que o comportamento observado estava associado às características dos resíduos complementares utilizados no blend e não ao lodo propriamente dito.

Em complemento, a utilização energética do lodo contribui para estratégias de economia circular, redução de passivos ambientais e descarbonização industrial.

Os resultados obtidos demonstram que o lodo industrial gerado na ETE da Cetrel possui potencial relevante para utilização como combustível alternativo em processos térmicos industriais, especialmente em aplicações voltadas à substituição parcial de gás natural e outros combustíveis fósseis.

RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos indicam a necessidade de continuidade dos estudos voltados à definição da tecnologia de secagem mais adequada para aplicação em escala industrial, buscando reduzir a umidade do lodo e potencializar sua utilização como matriz energética.

Recomenda-se a manutenção do monitoramento das emissões atmosféricas durante a utilização do lodo na incineração, conforme já previsto no plano de monitoramento ambiental estabelecido pela Licença de Operação da Unidade de Incineração. Dessa forma será possível acompanhar continuamente o desempenho ambiental do processo.

Ressalta-se que não fez parte do escopo deste trabalho a realização de estudo de viabilidade técnico-econômica comparando diferentes cenários de investimento (CAPEX) para implantação da etapa de secagem em relação à economia obtida com a redução do consumo de gás natural, tema que poderá ser desenvolvido em estudos futuros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica da valorização energética do lodo industrial gerado na ETE da CETREL por meio de rotas integradas de desaguamento, secagem e aplicação como matriz energética complementar no processo de incineração de resíduos perigosos.

Os ensaios de secagem evidenciaram forte correlação entre redução da umidade e aumento do poder calorífico superior do lodo, atingindo valores compatíveis com aplicação energética industrial e favorecendo sua utilização em blends contendo resíduos organoclorados e resíduos líquidos calóricos.

Os testes de aplicação em incineração demonstraram adequada homogeneização do lodo nos blends produzidos, estabilidade operacional do forno e ausência de formação significativa de escória associada ao material, indicando compatibilidade técnica para utilização no sistema de incineração da CETREL.

Os resultados também evidenciaram potencial relevante de substituição parcial do gás natural, principal combustível auxiliar utilizado na unidade. No melhor cenário operacional observado, o índice técnico de consumo de GN atingiu 59 Nm³/t, representando redução superior a 70% quando comparado à referência utilizando solo contaminado.

Além dos ganhos operacionais e ambientais, os resultados demonstraram importante potencial de redução de custos associados ao consumo de gás natural. Considerando o custo médio de R$ 3,48 por Nm³ de GN, os testes realizados apresentaram economia estimada entre R$ 205,32/t e R$ 629,88/t de blend incinerado, dependendo da referência operacional utilizada.

Durante o período avaliado, correspondente a aproximadamente 58,8 toneladas de blend alimentado no incinerador, a utilização do lodo como matriz energética representou economia estimada de aproximadamente 1.834 Nm³ de gás natural quando comparado à referência utilizando biomassa, equivalente a cerca de R$ 6.382,04.

Adicionalmente, a valorização energética do lodo representa alternativa alinhada aos princípios da economia circular, redução de passivos ambientais, mitigação de emissões atmosféricas e descarbonização industrial.

Os resultados obtidos reforçam o potencial de desenvolvimento de novas rotas sustentáveis para gestão de biossólidos industriais, promovendo maior agregação de valor ao resíduo e contribuindo para estratégias corporativas de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2001.

2. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Brasília, 2002. Disponível em www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-316-02-Tratamento-Térmico-de-Resíduos.pdf. Acesso em 20 de junho de 2026.

3. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education,* 2014.

4. USEPA. *Biosolids Technology Fact Sheet: Centrifuge Thickening and Dewatering. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency*, 2000.

5. VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Volume 4: Lodos Ativados. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2012.