



GANHO DE SUSTENTABILIDADE NA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – CASE CETREL

Mariana Ferreira Santos⁽¹⁾

Mestre em Energia, Bacharel em Química, atuando na área de tratamento térmico de resíduos há 12 anos.

Luiz Gustavo Silva Vieira⁽²⁾

Engenheiro Ambiental, Técnico em operação de processos industriais, atuando na área de tratamento térmico de resíduos há 10 anos.

Beatriz Torres Clemente⁽³⁾

Estagiária em Engenharia Química.

Endereço⁽¹⁾: Rua Rockefeller, 101 – Barris – Salvador – Bahia. CEP: 40070-160 - Brasil - Tel: +55 (71) 99729-7880 - Fax: +55 (71) 3632-7148 - e-mail: marianasantos@cetrel.com.br.

RESUMO

A incineração na CETREL é referência por sua elevada eficiência de destruição e remoção de compostos orgânicos perigosos, apresentando padrões internacionais de desempenho e qualidade. A sua elevada flexibilidade operacional permite a destruição térmica de ampla variedade de resíduos de alta periculosidade. Apesar da importância da incineração de resíduos perigosos, a CETREL reconhece que este processo não é isento de impactos para o meio ambiente devido as emissões de gases de efeito estufa, geração de cinzas e consumo de combustível fóssil. Desta forma, implementou um projeto em 2022 com o objetivo de minimizar impactos aumentando a sustentabilidade no processo. Neste projeto foi utilizada a biomassa na mistura dos resíduos organoclorados com a finalidade da redução do consumo de combustível, o gás natural. Anterior a este projeto, os resíduos organoclorados eram misturados a solos contaminados para que pudessem ser incinerados, havendo um elevado consumo de combustível. A implementação desta nova modalidade de mistura, viabilizou a inclusão de outros tipos de resíduos com poder calorífico elevado, que até então não eram possíveis para a incineração, resultando numa redução do consumo de gás por tonelada de resíduo incinerado e 58% das emissões de CO₂ (eq) por tonelada de resíduo incinerado.

PALAVRAS-CHAVE: Incineração de resíduos, Resíduos industriais, Reaproveitamento energético de resíduos.

INTRODUÇÃO

Com mais de 30 anos de experiência em incineração de resíduos industriais perigosos, a CETREL possui o maior parque de incineração do Brasil, processando os mais variados resíduos perigosos incineráveis do Polo Industrial de Camaçari (BA) e de outros estados brasileiros. A Unidade de Incineração conta com um incinerador de líquidos e outro de sólidos, com elevada eficiência de destruição. O parque de incineração conta com estrutura completa de controle e gerenciamento ambiental, garantindo segurança operacional, eficiência e tranquilidade para o cliente e comunidade local.

A incineração na CETREL é referência por sua elevada eficiência de destruição e remoção de compostos orgânicos perigosos, apresentando padrões internacionais de desempenho e qualidade. A sua elevada flexibilidade operacional permite a destruição térmica de uma ampla variedade de resíduos líquidos e gasosos de alta periculosidade, incluindo as bifenilas policloradas - PCBs, hexaclorobenzeno - BHC, pesticidas e outros.

O sistema de incineração de resíduos perigosos é composto por um forno rotativo seguido de uma câmara secundária de combustão e um sistema de controle da poluição do ar, que foi projetado para atender às exigências específicas desta aplicação.

O sistema de incineração de resíduos perigosos tem uma capacidade máxima total nominal de 4,5 cal/h. Gás natural é usado como combustível auxiliar para manutenção da temperatura mínima, aquecimento e resfriamento controlado dos fornos.

O incinerador está projetado para operar em uma modalidade livre de escória. Isto ocorre através do controle da temperatura de operação no forno rotativo abaixo do ponto de fusão dos sais e componentes inertes presentes nos resíduos alimentados. Cinzas secas, granulares, são despejadas da fornalha e recolhidas em



caixas metálicas adequadas a esse fim. A queima ocorre por meio da alimentação de oxigênio como comburente.

Após o processo de incineração, os gases de combustão, são encaminhados para o sistema de controle da poluição do ar para serem emitidos através da chaminé.

Os resíduos sólidos são alimentados no forno de incineração à granel e necessitam de um preparo anterior (blend) para que possam ser incinerados. A finalidade da preparação do blend é que haja a garantia dos parâmetros físico-químicos para que o tratamento térmico seja realizado de forma segura. Os parâmetros monitorados são os estabelecidos pelo CONAMA 316/02, além de parâmetros operacionais como umidade, cinzas, poder calorífico e concentração de cloro.

Apesar da importância da destruição térmica de resíduos industriais perigosos, a CETREL reconhece que um processo de incineração não é isento de impactos para o meio ambiente devido as emissões de gases de efeito estufa - GEE, geração de cinzas e consumo de combustível fóssil auxiliar. Desta forma, implementou um projeto no ano de 2022 com o objetivo de minimizar esses impactos e aumentando a sustentabilidade no processo da incineração.

O consumo do GN como combustível auxiliar sempre foi um ponto crítico na unidade operacional devido aos impactos negativos que ocasiona, junto ao fato da CETREL possuir experiência em operar um incinerador de resíduos líquidos sem o uso de um combustível auxiliar, foram os principais motivadores para avançar no desenvolvimento do referido projeto.

No projeto implementado foi utilizada a biomassa (resíduo de empresa de celulose) na mistura dos resíduos organoclorados com a finalidade da redução do consumo de combustível auxiliar, o gás natural - GN. Anterior a este projeto, os resíduos organoclorados eram misturados a outros tipos de resíduos (solos contaminados) para que pudessem ser incinerados, havendo um elevado consumo de GN.

OBJETIVO

Aumentar a sustentabilidade o incinerador de resíduos sólidos através da redução do consumo de gás natural devido a substituição da matriz de mistura dos resíduos para biomassa.

OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- Realizar a otimização energética do incinerador;
- Viabilizar a incineração de resíduos calóricos, que possuem limitações técnicas e operacionais;
- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa;
- Reduzir a geração de cinzas.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizada a metodologia *Lean Six Sigma* que representa um método de melhoria de processos, através das etapas DMAIC (definir, medir, analisar, implementar e controlar). Estas etapas estão especificadas a seguir:

• **Definir** – Realizada a delimitação do objetivo do projeto, o escopo, os participantes e quais indicadores seriam acompanhados. Foi definido a realização da substituição da matriz de mistura dos resíduos com a finalidade da otimização energética do incinerador. A principal motivação foi a redução do consumo do combustível fóssil, o gás natural (GN).

• **Medir** - Realizar o levantamento de todo o histórico dos consumos de GN do incinerador, avaliar a qualidade das informações, dos instrumentos de medição, assim como realizar a correlação com a qualidade energética dos resíduos incinerados.

• **Analisar** – Foi avaliada as informações levantadas nas etapas anteriores e estabelecida uma análise de causas para as possíveis variáveis de influência que levava ao consumo de GN. Esta análise de causa foi feita utilizando o diagrama de causa e efeito avaliando os seis tipos:

- Método: toda a causa envolvendo o método que estava sendo executado o trabalho;
- Material: toda causa que envolve o material que estava sendo utilizado no trabalho;
- Mão de obra: toda causa que envolve uma atitude do colaborador;

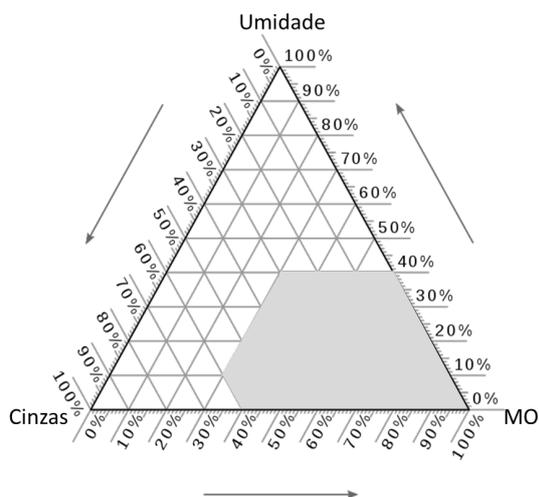


- Equipamento: toda causa envolvendo a máquina que estava sendo operada;
- Medida: toda causa que envolve os instrumentos de medida, sua calibração, a efetividade de indicadores em mostrar as variações de resultado, se o acompanhamento está sendo realizado, se ocorre na frequência necessária;
- Meio ambiente; toda causa que envolve o meio ambiente (poluição, calor, poeira) e, o ambiente de trabalho (layout, falta de espaço, dimensionamento inadequado dos equipamentos)

Após a elaboração da matriz de causa e efeito, foi mensurada os impactos por causa, as quais foram priorizadas para o levantamento do plano de ação. O plano de ação elaborado contou com 24 ações dentre elas a avaliação da implementação de um novo blend de resíduos com a biomassa como matriz de forma que viabilizasse a utilização de resíduos calóricos no incinerador de resíduos sólidos.

• **Implementar** – Nesta etapa foi aprofundado o plano de ação focando nas ações de maior impacto para a redução do consumo do GN. Aqui foi avaliada a viabilidade técnica da utilização da biomassa como matriz para mistura com resíduos organoclorados e incineração. A biomassa foi caracterizada avaliando todos os parâmetros de processo e operacionais, assim como o poder calorífico - PCS, percentual de cloro e umidade. Após caracterização foi realizada as projeções teóricas das novas possibilidades das misturas (blend). Para que o resíduo consiga ser substituto energético é necessário que ele tenha algumas características físico-químicas como a concentração de cinzas menor que 40%, umidade menor que 40% e matéria orgânica maior que 70% para garantir as melhores condições de combustibilidade (Figura 1).

Figura 1 – Gráfico ternário com as concentrações de cinzas, matéria orgânica e umidade para utilização de resíduo como substituto energético.



Fonte: elaboração própria a partir de dados de processo do incinerador.

Ainda na fase de implementação, foi avaliada as correlações entre o PCS dos resíduos, a carga de resíduo alimentada no incinerador e a carga térmica dos resíduos em relação ao consumo GN. Após a avaliação das correlações e projeção teórica foi realizada a avaliação da viabilidade técnica, através da produção das misturas da biomassa com os resíduos organoclorados com composições variadas para garantir a otimização energética. Foi realizada a avaliação de diversas proporções e definida, levando em consideração a maximização da utilização do resíduo organoclorado e do poder calorífico. Como a Cetrel estabelece premissas básicas a segurança de processo e redução de riscos, para esse projeto foi aplicada uma análise de riscos de processo e avaliação da gestão de mudança.

• **Controlar** - Após a validação da nova mistura de resíduos e implementação do novo padrão de Blend, foi estabelecido os principais índices técnicos de processo: consumo de GN, custo unitário do GN, quantidade de cinzas geradas e disponibilidade do incinerador.

Para a avaliação e comparação das emissões de gases de efeito estufa, foi apoiada nos princípios, conforme GHG Protocol Corporate Standard (FGV e WRI, 2008; FGV EAESP, 2018b) e norma ABNT NBR ISO 14064-1 (ABNT, 2007) durante o ano de 2021 e 2022.

RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados e discussões serão discutidos a seguir conforme as etapas de implementação e controle:

- **Definição da proporção ideal do blend** - Inicialmente foi preparado o blend somente com o resíduo organoclorado com biomassa (Figura 2). A biomassa auxiliou na estruturação do resíduo organoclorado, originalmente semissólido. A proporção entre resíduo e biomassa variou e definida conforme a concentração final de cloro, a qual não poderia ultrapassar 8% devido a limitação de projeto do incinerador. Em complemento, a biomassa conferiu poder calorífico para o blend.

Em seguida, foi preparado o blend com resíduo organoclorado, biomassa e resíduos triturados. A finalidade desta etapa foi otimizar o PCS do blend com o aporte de resíduos calóricos (Figura 3) e viabilizar o escoamento dos resíduos triturados no forno. A proporção entre os resíduos e biomassa também variou e foi definida conforme a concentração final de cloro (menor que 8%) e de PCS maior que 1.400 kcal/kg.

Figura 2 – Blend de resíduos organoclorados com biomassa.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3 – Blend de resíduos organoclorados, biomassa e triturados.



Fonte: elaboração própria.

- **Acompanhamento do consumo de GN** – O consumo de GN foi acompanhado em duas etapas, na etapa da incineração do blend do resíduo organoclorado com biomassa representado no gráfico da Figura 4, o



consumo médio foi de 150 Nm³/t incinerada, o que representou uma redução de 50% do consumo. Para os dias que não apresentaram valores, foi referente a parada para manutenção.

Na segunda etapa da incineração do blend de resíduo organoclorado, triturado e biomassa representado no gráfico da Figura 5, o consumo médio foi de 50 Nm³/t incinerada, o que representou uma redução de 83% do consumo.

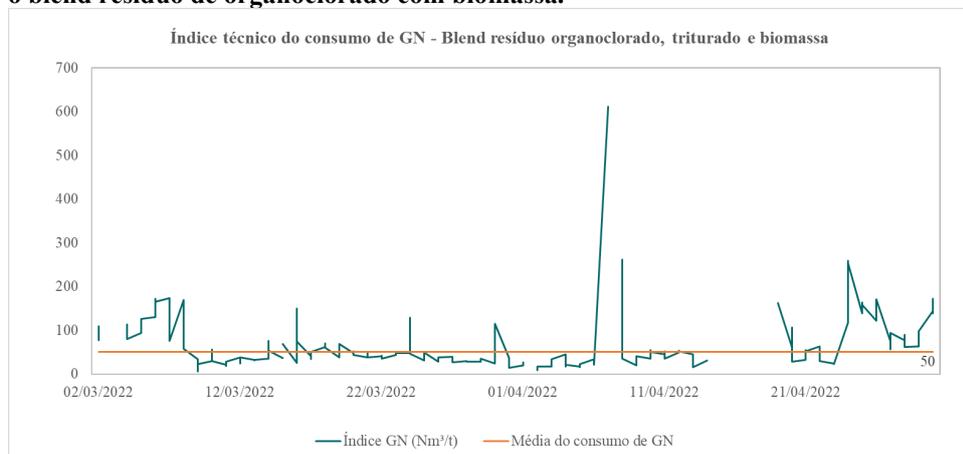
Avaliando o acumulado no ano representado no gráfico da Figura 6, observa-se a redução do consumo do GN para 118 Nm³/t de resíduo incinerada. Esse novo índice indicou a eficiência energética no incinerador após a implementação do novo blend.

Figura 4 – Gráfico do índice técnico do consumo de gás natural por tonelada de resíduo incinerado para o blend resíduo de organoclorado com biomassa.



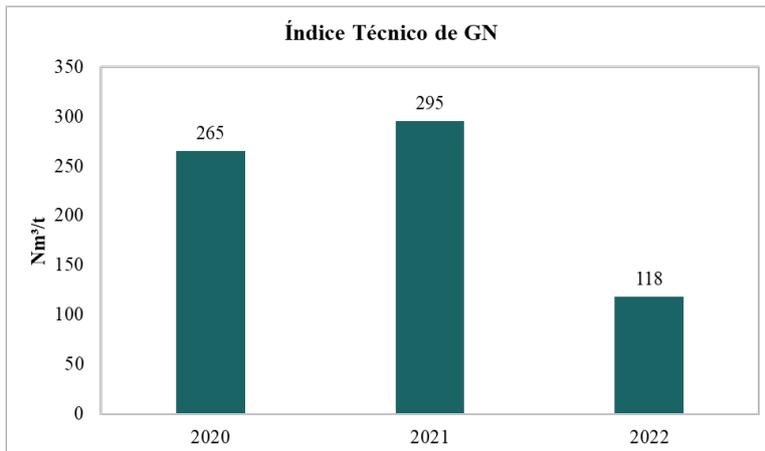
Fonte: elaboração própria a partir de dados de processo.

Figura 5 – Gráfico do índice técnico do consumo de gás natural por tonelada de resíduo incinerado para o blend resíduo de organoclorado com biomassa.



Fonte: elaboração própria a partir de dados de processo.

Figura 6 – Gráfico do índice técnico consolidado do consumo de gás natural por tonelada de resíduo incinerado.



Fonte: elaboração própria a partir de dados de processo.

- **Acompanhamento da eficiência de combustão** – foi feito o acompanhamento da eficiência de combustão antes e pós implementação do novo blend com biomassa e pode se observar através do gráfico da Figura 7, que não houve alteração na qualidade da combustão.

Figura 7 – Gráfico de eficiência de combustão do incinerador de resíduos sólidos antes e depois da implementação do projeto.



Fonte: elaboração própria a partir de dados de processo.

- **Acompanhamento das emissões de gases de efeito estufa** – para o acompanhamento das emissões dos gases de efeito estufa do incinerador foi levado em consideração a qualidade dos resíduos incinerados conforme orientação do IPCC (Tabela 1). Foi realizada a redução de emissão de 1,68 CO₂ (eq) t/t de resíduo incinerado para 0,98 CO₂ (eq) t/t de resíduo incinerado quando comparado os anos de 2021 e 2022.

Tabela 1 – Dados padrão para estimativa de emissões de CO₂ de incineração de resíduos.

Tipo de Resíduo	Resíduo Sólido Industrial	
dmi	Teor de matéria seca no resíduo	100%
CFi	Fração de carbono na matéria seca	50%
FCFi	Fração de carbono fóssil no carbono total	90%
OFi	Fator de Oxidação	100%

Fonte: IPCC (2006 / 2019) - *Chapter 5: Waste - Incineration and Open Burning of Waste*



- **Acompanhamento da geração de cinzas** – O volume das cinzas geradas, assim como a sua qualidade também foi acompanhada nesse projeto. Estimava-se que houvesse uma redução do volume visto que a base do blend produzido possui um percentual de matéria orgânica maior do que era praticado anteriormente com a utilização do solo contaminado. Após o acompanhamento durante o ano de 2022, observou-se a redução das cinzas de 80% por tonelada incinerada para 30% por tonelada incinerada. Este fato impacta positivamente na redução de disposição de resíduos em aterros, devido ao aumento do aproveitamento da combustão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a implementação da utilização da biomassa como alternativa para produção de blend e redução do consumo de GN no incinerador da CETREL, foi possível destacar a redução de custos com o consumo de combustível; melhoria na gestão de riscos do incinerador devido a redução do inventário de GN no forno rotativo e redução de paradas para remoção de escórias; maior credibilidade e interação junto a *stakeholders* por ter um processo de incineração com maior sustentabilidade devido as reduções de custo, de consumo de insumo e de emissões de GEE; melhoria do capital humano devido a redução do volume de cinzas, material quente e pulverizado, ambas manipuladas pelos operadores; criação de novas oportunidades de negócio devido a viabilização da incineração de resíduos calóricos que anteriormente não era possível, bem como a incineração na mistura com outros resíduos.

Diversos ganhos foram apresentados com a implementação do projeto, mas destaca-se a redução dos impactos da operação sobre o meio ambiente através da:

- Redução do consumo de combustível fóssil, o GN de 295 Nm³/t de resíduo incinerado para 118 Nm³/t de resíduo incinerado;
- Redução de cinzas de 80% por tonelada incinerada para 30% por tonelada incinerada, impactando positivamente na redução de disposição de resíduos em aterros, devido ao aumento do aproveitamento da combustão;
- Redução de 1,68 CO₂ (eq) t/t de resíduo incinerado para 0,98 CO₂ (eq) t/t de resíduo incinerado.

Esses resultados positivos só reforçam o compromisso da CETREL com a sustentabilidade ambiental, através da melhoria contínua dos seus processos.

Com a implementação deste projeto existe a possibilidade técnica de replicar em outros sistemas de tratamento térmico de resíduos que tenham a utilização como combustível fóssil em seu processo. Há a viabilidade da aplicação em outras unidades de incineração, pirólise e coprocessamento de resíduos. Para além disso, o conceito de reaproveitamento energético de resíduos como combustível alternativo ainda é um tema promissor, que poderá ser amplamente difundido em diversas áreas e funcionando em uma combinação entre o destino ambientalmente adequado para os resíduos com a redução do consumo de combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHN, J.; CHANG, D. *Fuzzy-based HAZOP study for process industry. Journal of Hazardous Materials*, v. 317, p. 303-311, 2016. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.096.
2. BELGIORNO, V.; FEO, G. de; DELLA ROCCA, C.; NAPOLI, R.M.A. *Energy from gasification of solid wastes. Waste Management*, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2003. Doi: 10.1016/s0956-053x(02)00149-6
3. _____. CONAMA 316/2002. 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
4. CHADBOURNE, J.F. *Cement Kilns. Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*, 1997.
5. GOHLKE, O.; MARTIN, J. *Drivers for innovation in waste-to-energy technology. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, v. 25, n. 3, p. 214-219, 2007. Doi: 10.1177/0734242x07079146.
6. IPCC. *Uncertainties - IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change*. [S.l.]. 2006.

7. IPCC. *Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR5)*. [S.l.]. 2013.
8. LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A.. *A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste*. *Waste Management*, v. 37, p. 26-44, 2015. Doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.010.
9. MICHAEL, T.. *Environmental and social impacts of waste to energy (WTE) conversion plants*. *Waste To Energy Conversion Technology*, p. 15-28, 2013. Doi: 10.1533/9780857096364.1.15.
10. VIEIRA, M. P. *Fundamentos de Incineração*. São Paulo: Editora Gregory, 2012. 300 p.
11. YANG, P.; ZHANG, L.J.; WANG, X.J.; WANG, Z.L. *Exploring the management of industrial hazardous waste based on recent accidents*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 67, p. 104224, 2020. Doi: 10.1016/j.jlp.2020.104224.