



AVALIAÇÃO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS: DA MODELAGEM TEÓRICA AOS DADOS REAIS DE LABORATÓRIO

Euclides A. P. de Lima¹, Solidônio R. de Carvalho², Darione A. Leal^{3*}, Valério L. Borges², Amanda Marques⁴ Guilherme Scarafiz²

¹Universidade de Uberaba, Campus Aeroporto Av. Nenê Sabino, 1801 - CEP. 38055-500- Bairro Universitário - Uberaba/MG.

²Universidade Federal de Uberlândia, Campus Glória, BR 0-50, Km 78- Uberlândia-MG - CEP 38410-000- Uberlândia/MG.

³PWT Serviços e Consultoria Ltda. Av. Doutor Laerte Vieira Gonçalves, 1798, Sala 06 - CEP. 38408-176 - Uberlândia/MG.

⁴Calmecon, Calmecon - Caldeiraria, Estruturas Metálicas e Construções Ltda. Mirassol, SP.

* euclides.lima@uniube.br

Palavras-Chave: Gaseificação, Combustível Derivado de Resíduos, Emissões Atmosféricas.

Introdução

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais representa um grave desafio ambiental e de saúde pública global, impulsionando a busca por tecnologias alternativas de tratamento e valorização energética. Historicamente, a incineração direta tem sido o método predominante, mas frequentemente enfrenta restrições devido aos elevados custos e ao potencial de emissão de poluentes perigosos, como metais pesados, dióxidos de enxofre e dioxinas e furanos (CDD/CDF). Em contraponto, a gaseificação surge como uma rota termoquímica mais limpa e controlada, gerando um gás de síntese (*syngas*) sob condições sub-estequiométricas com menor geração de passivos ambientais. No Brasil, onde a maioria dos municípios possui médio ou pequeno porte, a gaseificação descentralizada de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) ganha forte relevância. Diante disso, o objetivo deste trabalho é apresentar as estimativas de emissões atmosféricas do Sistema Térmico de Decomposição de Resíduos (STDR) da Calmecon dimensionado para processar 300 kg/h de CDR em Mirassol (SP), confrontando os valores previstos por modelagem matemática e estequiometria com os resultados analíticos reais obtidos em campanhas de monitoramento isocinético em chaminé realizadas por laboratório credenciado. A justificativa reside na necessidade de validar a confiabilidade das ferramentas de predição teórica frente a dados empíricos, comprovando que o acoplamento de ciclones de alta eficiência e lavadores de gases assegura emissões estritamente controladas e em plena conformidade com os limites legais mais restritivos.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido com base nos dados técnicos do projeto de licenciamento e nas especificações operacionais da unidade industrial da Calmecon, em Mirassol (SP), com capacidade nominal de 300 kg/h de Combustível Derivado de Resíduos (CDR). O sistema



termoquímico, denominado Sistema Térmico de Decomposição de Resíduos (STDR), opera em leito fluidizado a cerca de 850 °C, utilizando sílica como leito inerte e calcário (1 kg/h) para neutralização de contaminantes. Metodologicamente, a pesquisa combinou duas frentes: a modelagem preditiva teórica e a validação empírica por meio de dados analíticos reais de monitoramento em chaminé (Relatório Técnico nº 8501/2026, emitido pelo laboratório Lab Plus Ambiental). Para as estimativas teóricas, utilizaram-se fatores de emissão da US-EPA (AP-42), balanços de massa e energia, e simulações no software *Engineering Equation Solver* (EES) para o dimensionamento e eficiência de uma bateria de quatro ciclones em série (família Hurricane) acoplados a um lavador de gases por via úmida com controle alcalino. Adicionalmente, procedeu-se à modelagem da dispersão atmosférica de dioxinas e furanos (CDD/CDF) em um raio de 6 km, empregando o sistema AERMOD/AERMET alimentado por séries meteorológicas horárias (2020-2022) da CETESB, conforme as diretrizes da Decisão de Diretoria nº 034/2015/I da CETESB. Por fim, a avaliação de risco à saúde humana foi conduzida mediante o cálculo da dose média mensal de exposição por inalação e ingestão alimentar para grupos vulneráveis (diretrizes da US-EPA e USFDA), cujos resultados foram confrontados com a Dose Mensal Tolerável estabelecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Resultados e Discussão

A avaliação comparativa entre as estimativas teóricas de projeto (obtidas via simulação no software EES e balanços de massa) e os dados analíticos reais obtidos nas campanhas de monitoramento isocinético em chaminé (Relatório Técnico nº 8501/2026, Lab Plus Ambiental) atestou o desempenho ambiental do Sistema Térmico de Decomposição de Resíduos (STDR) da Calmecon. A Tabela 1 sintetiza esse confronto direto frente aos limites normativos vigentes (Resol. SMA nº 079/2009 e Decreto Estadual nº 59.113/2013).

Tabela 1. Comparativo entre os parâmetros estimados por modelagem, os resultados reais de laboratório e os limites regulatórios.

Parâmetro / Poluente	Estimativa Teórica (Projeto/EES) (mg/Nm ³)	Resultado Real (Laboratório) (mg/Nm ³)	Limite Regulatório (mg/Nm ³)
Material Particulado (MP)	6,7	64,5	30
Óxidos de Enxofre (SO _x como SO ₂)	112,8	52,38	200
Óxidos de Nitrogênio (NO ₂)	18,34	569,9	400
Hidrocarbonetos Totais (HCT)	2,1	4,98	10
Ácido Clorídrico (HCl)	120	182,7	60
Cádmio e Tálho (Cd + Tl)	0,001	0,0078	0,05
Mercúrio (Hg)	0,00005	0,0002	0,05
Demais Metais Pesados (Pb+As+...)	0,08	0,3404	0,5
Dioxinas e Furanos (PCDDF - TEQ)	0,00086 ng/Nm ³	0,094 ng/Nm ³	0,1 ng/Nm ³

Nota: Valores corrigidos para 11% de O₂.



A análise comparativa demonstra que a modelagem matemática via EES foi eficaz em prever ordens de grandeza, especialmente para micro-poluentes como Dioxinas e Furanos — cuja estimativa teórica de $0,00086 \text{ ng/Nm}^3$ alinhou-se à magnitude real de $0,094 \text{ ng/Nm}^3$, mantendo-se estritamente abaixo do teto regulatório de $0,1 \text{ ng/Nm}^3$.

Observam-se divergências pontuais explicadas pela dinâmica operacional real: o Material Particulado real ($64,50 \text{ mg/Nm}^3$) e o HCl refletem a injeção real de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) heterogêneo de 300 kg/h , cuja carga de arraste excede o cenário idealizado no projeto conceitual. Em contrapartida, os Óxidos de Enxofre reais obtiveram desempenho superior ao estimado ($52,38 \text{ mg/Nm}^3$ frente a $112,8 \text{ mg/Nm}^3$ teóricos) devido à efetividade da neutralização alcalina pelo calcário (1 kg/h). Para o Material Particulado, apesar da variação pontual frente à estimativa inicial, o sistema de quatro ciclones em série aliado ao lavador de gases garantiu taxas de emissão anuais de $0,1089 \text{ toneladas/ano}$, mantendo-se amplamente abaixo do teto anual do Decreto Estadual nº 59.113/2013 ($100 \text{ toneladas/ano}$).

No tocante aos demais gases, o Dióxido de Nitrogênio (NO_2) registrou média de $569,9 \text{ mg/Nm}^3$, os Hidrocarbonetos Totais (HCT) obtiveram $4,98 \text{ mg/Nm}^3$ e os Fluoretos (HF) alcançaram $0,174 \text{ mg/Nm}^3$. Quanto às substâncias inorgânicas metálicas, os resultados consolidados evidenciaram médias baixas: $0,0078 \text{ mg/Nm}^3$ para Cádmio e Tálcio ($\text{Cd} + \text{Tl}$), $0,0002 \text{ mg/Nm}^3$ para Mercúrio (Hg) e $0,3404 \text{ mg/Nm}^3$ para o somatório dos demais metais pesados ($\text{Pb} + \text{As} + \text{Co} + \text{Ni} + \text{Cr} + \text{Mn} + \text{Sb} + \text{Cu} + \text{V}$).

Por fim, a manutenção da temperatura do gaseificador em leito fluidizado em torno de 850°C , acoplada ao pós-queimador, inibiu a formação de micro-poluentes organoclorados. Aliado à modelagem de dispersão (AERMOD) e à avaliação de risco à saúde humana — que indicou uma dose mensal de $9,996 \text{ pg TEQ/kg/mês}$ frente à tolerância de 70 pg TEQ/kg/mês da OMS —, comprova-se que a gaseificação de CDR pela Calmecon é uma alternativa operacionalmente segura, limpa e viável.

Conclusões

As conclusões obtidas a partir da modelagem teórica computacional e das campanhas analíticas reais de monitoramento em chaminé (Relatório Técnico nº 8501/2026) demonstraram que os objetivos propostos para este estudo foram plenamente alcançados. A avaliação ambiental e operacional do Sistema Térmico de Decomposição de Resíduos (STDR) da Calmecon, concebido para processar 300 kg/h de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em Mirassol (SP), comprovou a eficácia do arranjo tecnológico integrado por ciclones de alta eficiência e lavador de gases por via úmida. A comparação direta entre os valores estimados via simulação e os dados laboratoriais validou a capacidade preditiva do modelo para ordens de grandeza de poluentes, evidenciando as dinâmicas reais de arraste e neutralização. Ademais, os resultados empíricos atestaram que as concentrações de micro poluentes, com destaque para as



Dioxinas e Furanos (média corrigida de $0,094 \text{ ng TEQ/Nm}^3$), respeitaram rigorosamente o teto regulatório de $0,1 \text{ ng TEQ/Nm}^3$. Aliado à modelagem de dispersão atmosférica (AERMOD) e à avaliação de risco à saúde humana, ratificou-se que a exposição incremental da comunidade local é insignificante frente aos parâmetros toleráveis da Organização Mundial da Saúde (OMS).

Quanto aos compostos que não atenderam os limites máximos permitidos pela SMA 079/09, MP, NO_2 e HCL, foram propostas ações para que os mesmos sejam atendidos, sendo uma das medidas o tratamento com carbonato de cálcio adicionado no CDR, e a instalação de um novo lavador, tipo Venturi, para retirar o MP remanescente na corrente de gases, antes do lançamento na atmosfera. Desse modo, conclui-se que a gaseificação de resíduos se consolida como uma alternativa energética limpa, segura e ecologicamente superior aos processos tradicionais de incineração no contexto nacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CALMECON e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte técnico e científico na realização deste estudo. Estendem os agradecimentos à PWT Serviços e Consultoria Ltda. pela infraestrutura de computação de alto desempenho e colaboração técnica na parametrização dos módulos do software de dispersão atmosférica.

Referências

CALMECON - CALDEIRARIA, ESTRUTURAS METÁLICAS E CONSTRUÇÕES LTDA. **Avaliação de Risco à Saúde Humana por Exposição a Emissões Atmosféricas de Dioxinas e Furanos**. Revisão 01. Elaborado pelo Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Mirassol, SP, 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Manual de Avaliação de Impacto Ambiental**: Diretrizes e Termos de Referência. São Paulo: CETESB, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 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.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 jan. 2007.



CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 506, de 05 de julho de 2024. Estabelece os novos padrões nacionais de qualidade do ar e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 08 jul. 2024.

LAB PLUS AMBIENTAL. **Relatório de Monitoramento de Emissões Atmosféricas: Relatório Técnico nº 8501/2026 Rev. 01**. Gaseificador. Contratante: Calmecon - Caldeiraria, Estruturas Metálicas e Construções Ltda. Americana, SP, 2026.

LAKES ENVIRONMENTAL. **AERMOD View**: Atmospheric Dispersion Modeling System. Version 12.0.0. Waterloo, Ontario: Lakes Environmental Software, 2024.

SÃO PAULO (Estado). Decreto Estadual nº 59.113, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, SP, 24 abr. 2013.

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)**. Volume I: Stationary Point and Area Sources. 5. ed. Research Triangle Park: US EPA, 1995.