

NOTA TÉCNICA
INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS

Carlos Alberto Mendes Moraes
Débora Machado de Souza
Genyr Kappler

São Leopoldo – Abril 2025

1. Introdução

O Núcleo de Caracterização de Materiais – NucMat em conjunto com a Aliança Resíduo Zero Brasil – ARZB, com apoio financeiro da Aliança Global para a Alternativa à Incineração – GAIA, apresenta neste documento elementos que contribuem para o entendimento e a tomada de decisão sobre a incineração de Resíduos Sólidos Urbanos. As considerações aqui expostas resultam de pesquisas em diversas bases de dados e da experiência multidisciplinar da equipe do NuCMat, instituído há 20 anos.

2. Descrição do projeto

O projeto faz parte de um acompanhamento realizado pelo grupo NuCMat sobre o tema Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, considerando o avanço de Propostas de Leis na Câmara dos Deputados, Leilões de Energia, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), e o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, além da atuação dos mais de 200 movimentos contrários a incineração em diversos estados brasileiros.

O objetivo do projeto é apresentar uma análise acadêmica sobre aspectos relevantes da incineração de RSU, fundamentada em dados da literatura e experiência de pesquisadores, contribuindo para um debate qualificado e embasado em evidências científicas.

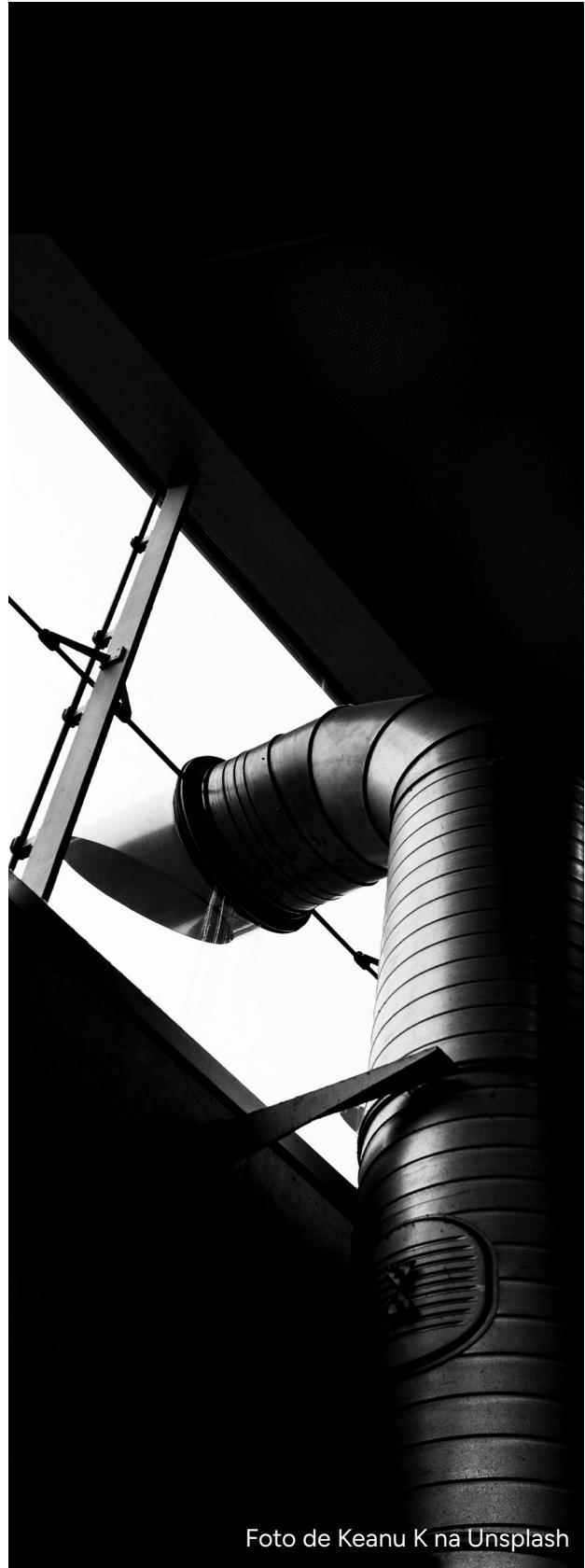


Foto de Keanu K na Unsplash

3. Impactos ambientais negativos

Os impactos ambientais negativos da incineração de resíduos sólidos urbanos estão diretamente relacionados à sua composição diversificada. Materiais como lâmpadas, pilhas, baterias, restos de tintas, produtos de limpeza, óleos lubrificantes usados, solventes, embalagens de aerossóis e produtos químicos, componentes eletrônicos, resíduos farmacêuticos e plásticos como o PVC, quando incinerados, liberam parte de seus constituintes na forma de compostos voláteis ou cinzas. Essas emissões podem conter metais pesados, poluentes orgânicos persistentes (POPs) entre outras substâncias tóxicas, representando riscos para o meio ambiente e a saúde pública.

Durante a incineração, metais como por exemplo do cádmio e o mercúrio, que são metais pesados voláteis, podem ser liberados na fase vapor dentro do incinerador, condensando-se posteriormente na superfície das partículas de cinza suspensas no ar. Uma vez no ambiente, essas partículas podem ser transportadas pelo vento e depositadas no solo ou na vegetação, contaminando ecossistemas. O enxofre, presente em artefatos de borracha, é convertido em dióxido e trióxido de enxofre dentro da câmara de combustão, contribuindo para a formação da chuva ácida (Carneiro, 2023).

Além dos metais pesados, a incineração gera compostos orgânicos persistentes, como as dioxinas (2,3,7,8-TCDD) e os furanos (2,3,4,7,8-PeCDF)¹ (Morgan Henley, 2024), altamente tóxicos e bioacumulativos. Devido à sua natureza lipofílica, essas substâncias podem se acumular na biota de ambientes aquáticos e terrestres, apresentando sérios riscos ecológicos. As dioxinas possuem log Kow de 6,8 e os furanos, de 6,93, classificando-os como extremamente lipofílicos.

De acordo com Christoffoleti et al. (2008)², os valores de log Kow podem ser classificados como:

- Log Kow <0,1 – Hidrofílico - se dissolve na água
- Log Kow 0,1 a 1 – Mediamente hidrofílico - se dissolve na água
- Log Kow 1 a 2 – Lipofílico - se dissolve em lipídios ou gorduras
- Log Kow 2 a 3 – Muito lipofílico - se dissolve em lipídios ou gorduras
- Log Kow >3 – Extremamente lipofílico - se dissolve em lipídios ou gorduras

1 (Morgan Henley, 2024)

2 Christoffoleti et al. (2008)

Segundo Carneiro (2023)³ existem três mecanismos pelos quais as dioxinas e os furanos podem ser formados durante o processo de incineração:

- **Problemas operacionais** – Quando a incineração ocorre em temperaturas inferiores a 800 °C, as dioxinas e furanos presentes nos resíduos não são completamente destruídos, resultando em sua liberação no ambiente.
- **Formação a partir de precursores** – Esses compostos podem ser gerados durante a incineração a partir de resíduos que contêm substâncias precursoras de dioxinas e furanos.
- **Formação catalisada por metais** – Esse mecanismo ocorre entre 200 e 600 °C, quando a presença de certos metais favorece reações entre compostos contendo cloro, carbono e oxigênio, resultando na síntese de dioxinas e furanos.

4. Impactos negativos à saúde humana

Os impactos negativos à saúde humana estão relacionados com as características intrínsecas de alguns poluentes gerados durante a incineração dos RSU. As dioxinas e furanos, são exemplos desses poluentes. Extremamente lipofílicos (substâncias lipofílicas no meio ambiente, se armazenam nos tecidos de animais), podem levar a exposição humana por meio de bioacumulação e bioamplificação (onde os efeitos aumentam ao longo da cadeia alimentar). A exposição humana ocorre principalmente pela transferência ao longo do caminho:

Emissão atmosférica → ar → deposição cadeia alimentar aquática/terrestre → dieta

As principais fontes da dieta são os alimentos gordurosos de origem animal, que podem representar até mais de 90 % do total de ingestão de dioxinas e furanos para uma população geral. No organismo, podem permanecer por longo tempo, se acumular em tecidos gordurosos e serem liberados lentamente para a corrente sanguínea. A lactação e a perda significativa de peso aumentam a liberação das substâncias no sangue⁴.

3 Carneiro (2023)

4 (FIT CETEB, 2023).

5. Impactos sociais negativos

O impacto social negativo está relacionado a fatores como potencial de geração de emprego. As Unidades de Recuperação Energéticas (UREs) são usinas grandes e bastante automatizadas, sua implantação geraria poucos empregos. Em contrapartida, as cooperativas iriam fechar com o tempo. Essas cooperativas dão trabalho para um grande número de brasileiros de forma direta, e em torno de 4 vezes os beneficiados indiretamente. Com as cooperativas toda a sociedade se torna beneficiada, pelo desvio de RSU dos aterros, pela sua logística reversa, pela redução da extração de minerais do solo o que reduz enormemente os impactos ambientais no solo, água e ar.

6. Impactos na matriz energética brasileira

O Brasil não tem dificuldade para gerar energia. A matriz elétrica brasileira registrou a maior expansão da história (início da medição em 1997) em 2024, encerrando o ano com um acréscimo de 10.853,35 megawatts (MW). O aumento está associado a 301 novas usinas que entraram em operação, sendo 268 de fonte eólica e solar, somando um percentual de 91,13 % do acréscimo total registrado no ano (Governo Federal, 2025). Os dados acima relatados sugerem que o objetivo de incinerar RSU não está ligado a necessidade energética e sim a vontade de transferir a responsabilidade estendida do produtor de embalagens e produtos para uma empresa com alta lucratividade, e dos municípios pela coleta de RSU e destinação para unidades de triagem. Os municípios e estados estão sofrendo uma grande pressão para destinação dos seus resíduos e encerramento dos lixões (conforme mostra as citações apresentadas no documento de Brasil, 2023) com isso as Unidades de Recuperação Energéticas, se tornam alternativas atrativas.

7. Viabilidade econômica

A viabilidade econômica de instalação das Unidades de Recuperação Energéticas para incineração de RSU apresenta alguns impactos negativos relacionados ao custo de investimento e custo operacional. A URE para RSU é além de ser uma das ofertas com maior CAPEX (Capital Expenditure) (entre 14.500 a 27.000 R\$/kW), perdendo apenas para as Usinas nucleares (entre 22.000 a 29.400 R\$/kW), possuem um alto custo operacional contínuo no monitoramento dos poluentes. O monitoramento dos poluentes engloba desde a manutenção de equipamentos como: sistema de catálise o NO_x, lavadores de gases, filtros manga, filtros de mangas cerâmicas para dioxinas e furanos e precipitadores eletrostáticos; até análises físico-químicas.

8. Recomendação

O tema resíduo sólido urbano vai além de propostas e tecnologias de final de tubo, nas quais buscam solucionar um problema já existente. Há uma necessidade emergente de mudança de paradigmas no país, colocando em prática a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, estabelecida pelo art. 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos, na qual a não geração é a ação prioritária a ser adotada, seguida da redução. Produtos que não se adequam ao modelo circular, baseado no ciclo de vida, não deveriam ser produzidos, pois se encaixam em modelos lineares, nos quais necessitam de investimentos de tecnologias pós-consumo. Outros países já adotam esse modelo, como a Alemanha, que desde 2021 proíbe a comercialização de diversos produtos de polímero de uso único, como talheres, canudos, copos, embalagens de isopor e palitos de balão. O Chile, a Inglaterra, a Índia, a Nigéria, a Tanzânia, entre outros também são países que proíbem ou restringiram os polímeros de uso único.

APÊNDICE I – Tecnologias de conversão termoquímica atualmente empregadas no tratamento de RSU

Tecnologia	Definição	Objetivo principal	Características técnicas	Eficiência e impactos
Combustão ⁵	Processo de reação química exotérmica entre um combustível e um comburente (normalmente oxigênio), gerando calor, gases e, em alguns casos, resíduos sólidos.	Geração de energia em usinas termoelétricas; Sistemas de aquecimento industrial e residencial. Tratamento com recuperação de energia dos resíduos (waste-to-energy).	Normalmente ocorre em presença de oxigênio em excesso; Opera com combustíveis fósseis e biomassa; Temperatura entre 800°C e 1.100°C; Produz energia térmica. Pode ser controlada para minimizar a emissão de poluentes.	Eficiência de 20-45% com biomassa seca; Pode gerar emissões como CO ₂ , NO _x , SO _x e material particulado; Contraindicado para RSU devido à composição complexa e presença de componentes perigosos; Para resíduos perigosos é necessário o uso de equipamentos de controle de poluição atmosférica para reduzir emissões de dioxinas, furanos e metais pesados o que aumenta significativamente o custo do processo. Dependendo do combustível utilizado, cinzas e escórias podem conter substâncias tóxicas e necessitam tratamento e destinação em aterros.
Incineração ⁶	Processo de combustão controlada utilizado para eliminar resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, reduzindo o volume, eliminando patógenos e prolongando a vida útil de aterros	“Destrução” (redução de massa e volume) dos resíduos antes da disposição final; Tratar resíduos hospitalares e industriais perigosos;	Ocorre em fornos específicos (ex.: fornos rotativos, de grelha móvel). Pode ocorrer em diferentes temperaturas (850°C a 1450°C, dependendo do resíduo).	Eficiência máxima de aproximadamente 20% Contraindicado para RSU devido à composição complexa e presença de componentes perigosos; Para resíduos perigosos é necessário o uso de equipamentos de controle de poluição atmosférica para reduzir emissões de dioxinas, furanos e metais pesados o que aumenta significativamente o custo do processo. Dependendo do combustível utilizado, cinzas e escórias podem conter substâncias tóxicas e necessitam tratamento e destinação em aterros.
Coprocessamento ⁷	Utiliza materiais derivados de resíduos para substituir recursos naturais minerais (reciclagem de materiais) e/ou combustíveis fósseis tradicionais como carvão, óleo combustível e gás natural (recuperação de energia) em processos industriais.	O coprocessoamento é aplicado principalmente na indústria de cimento e em usinas termelétricas no mundo todo. Em alguns casos também é aplicado na indústria de aço e cal.	Ocorre em temperaturas elevadas (acima de 1450°C), garantindo a conversão/reação completa dos resíduos. O forno de clínquer possui um longo tempo de residência, podendo contribuir para a destruição de substâncias orgânicas tóxicas. Não há geração de cinzas, pois os resíduos são incorporados ao produto final (cimento).	Eficiência de 85 - 95%, a depender das características dos resíduos; As emissões potenciais de usinas de cimento incluem poeiras, NO _x , SO ₂ , bem como dioxinas e furanos, CO, CO ₂ , compostos orgânicos voláteis, (HCl), ácido fluorídrico (HF) e metais pesados; Os compostos orgânicos tóxicos são totalmente destruídos nas chamas com uma temperatura acima de 2,000°C; Escórias podem conter materiais valiosos, como metais, que podem ser recuperados, e conter substâncias tóxicas, que devem ser tratadas separadamente e descartadas em local de aterro seguro.

5 (Dieter Mutz, 2017; Sadeq et al., 2025; Turns, 2012; Winterbone, 1997)

6 (Bonner, 1981; Dieter Mutz, 2017)

7 (Amran et al., 2022; Chatziaras; Psomopoulos; Themelis, 2016; Dieter Mutz, 2017)

APÊNDICE II – Tecnologias de conversão termoquímica atualmente empregadas no tratamento de RSU

Tecnologia	Definição	Aplicação	Características técnicas
Pirólise ⁸	<p>Processo termoquímico no qual materiais orgânicos, como biomassa ou resíduos sólidos, são aquecidos em um ambiente com ausência ou quantidade mínima de oxigênio. Durante a pirólise, a decomposição térmica dos materiais gera três produtos principais: material carbonizado, bio-óleo e gases permanentes.</p>	<p>Produção de biochar (carvão vegetal), que pode ser utilizado como fertilizante ou para a captura de carbono, quando atender parâmetros qualitativos e quantitativos estabelecidos em normas;</p> <p>Bio-óleo para ser utilizado como bio-inssumos, ou combustível renovável, dependendo da matéria prima original;</p> <p>Gases combustíveis (principalmente metano, CO₂, e outros hidrocarbonetos) podem ser usados como fonte de energia.</p>	<p>Temperatura: Normalmente entre 350°C a 700°C;</p> <p>Ausência de oxigênio: O processo ocorre em um ambiente sem oxigênio, o que impede a combustão;</p> <p>Produtos principais: Biochar (uso ambiental), carbonizado, bio-óleo e gases;</p> <p>Tempo de residência: Pode variar entre minutos a algumas horas, dependendo do tipo de pirólise (rápida ou lenta);</p> <p>Carbonizado de resíduos pode conter substâncias tóxicas e deve ser destinado a aterro seguro.</p>
Gaseificação ⁹	<p>Processo termoquímico em que os materiais são aquecidos em condições de oxigênio limitado, gerando um gás de síntese (syngas) composto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂).</p>	<p>Produção de energia: O syngas pode ser usado para gerar eletricidade ou calor de forma eficiente, aplicável em usinas de energia a partir de resíduos.</p> <p>Produção de produtos químicos: O syngas pode ser convertido em produtos químicos ou combustíveis líquidos por meio de processos adicionais, como a síntese de Fischer-Tropsch;</p> <p>Redução de resíduos: Como a gaseificação converte resíduos em gás, há uma redução significativa no volume de resíduos sólidos gerados, que pode ser mais facilmente tratado.</p>	<p>Temperatura: Normalmente entre 700°C a 1.200°C;</p> <p>Subprodutos: O principal subproduto é o syngas, mas também podem ser gerados resíduos sólidos (como cinzas), que precisam ser gerenciados;</p> <p>Flexibilidade: A gaseificação pode ser aplicada a diversos tipos de resíduos, incluindo plásticos, papel, madeira e resíduos orgânicos.</p>

8

(Li et al., 2020; Zhao et al., 2022)

9

(Bishoge et al., 2019)

APÊNDICE III – Tecnologias de conversão biológica atualmente empregadas no tratamento da fração orgânica do RSU

Tecnologia	Definição	Aplicação	Características técnicas
Compostagem ¹⁰	<p>Processo biológico aeróbico de decomposição de materiais orgânicos, como restos de alimentos, folhas, palha, entre outros, por micro-organismos (fungos, bactérias, actinobactérias) na presença de oxigênio, transformando-os em composto orgânico ou humus, que pode ser usado como fertilizante.</p>	<p>Reciclagem de resíduos orgânicos: A compostagem é uma excelente maneira de reduzir o volume de resíduos orgânicos e gerar fertilizante natural;</p> <p>Melhoria do solo: O composto gerado é usado para enriquecer o solo, melhorar a sua estrutura e fertilidade, aumentar a retenção de água e promover o crescimento de plantas;</p> <p>Redução de resíduos em aterros sanitários: Diminui a quantidade de resíduos orgânicos enviados para aterros sanitários.</p>	<p>Ambiente: Aeróbico, ou seja, depende de oxigênio;</p> <p>Temperatura: O processo gera calor, e as temperaturas podem variar entre 50°C a 70°C durante a fase de aquecimento;</p> <p>Tempo: A compostagem pode durar de algumas semanas a meses, dependendo das condições e do material compostado;</p> <p>Subprodutos: Produz composto orgânico (humus), que é rico em nutrientes para as plantas.</p>
Biodigestão ¹¹	<p>Processo anaeróbico, ou seja, ocorre na ausência de oxigênio, no qual bactérias e outros micro-organismos decompõem resíduos orgânicos, como estrume, restos de alimentos e resíduos agrícolas, gerando biogás (principalmente metano) e digestato (resíduo sólido ou líquido rico em nutrientes).</p>	<p>Geração de energia: O biogás gerado pode ser utilizado como fonte de energia renovável, tanto para geração de eletricidade quanto para aquecer ou alimentar processos industriais;</p> <p>Tratamento de resíduos orgânicos: A biodigestão é ideal para tratar resíduos de origens diversas, como resíduos alimentares, esterco animal e resíduos de esgoto;</p> <p>Produção de fertilizantes: O digestato, subproduto do processo, pode ser usado como fertilizante ou para melhorar a qualidade do solo.</p>	<p>Ambiente: Anaeróbico, ou seja, sem oxigênio;</p> <p>Temperatura: A biodigestão pode ocorrer em temperaturas mesofílicas (30°C a 40°C) ou termofílicas (50°C a 60°C), dependendo do tipo de digestor;</p> <p>Tempo: O processo de biodigestão é mais demorado que a compostagem, geralmente entre 20 a 30 dias, mas pode ser ajustado dependendo das condições;</p> <p>Subprodutos: Produz biogás e digestato, que pode ser utilizado como fertilizante orgânico.</p>

10 (Kumar, 2011)

11 (Appels et al., 2011; Khalid et al., 2011)

APÊNDICE IV – Comparação entre as tecnologias utilizadas atualmente para tratamento de RSU

Característica	Compostagem ¹²	Biodigestão ¹³	Combustão ¹⁴	Incineração ¹⁵	Coprocessamento ¹⁶	Pirólise ¹⁷	Gaseificação ¹⁸
Objetivo principal	Tratamento de resíduos orgânicos como restos de alimentos, folhas etc.	Tratamento de resíduos orgânicos como estrume, resíduos alimentares, esgoto etc.	Geração de calor e energia	Redução de resíduos com possível recuperação de energia	Substituição de combustíveis e matérias-primas	Produção de biochar, bio-óleo e gases	Produção de syngas (CO, H ₂)
Temperatura			500 - 1200	850 - 1450	1450+	350°C a 700°C	700°C a 1.200°C
Oxigênio	Aeróbico (presença de oxigênio)	Anaeróbico (ausência de oxigênio)	Sim (reação aeróbica)	Sim (reação aeróbica)	Sim (reação aeróbica)	Ausência de oxigênio	Presença limitada de oxigênio
Produtos principais	Composto orgânico (humus)	Biogás (metano) e digestato	Energia térmica	Energia térmica (quando recuperada)	Cimento, clinquer, cal, energia	carbonizado, bio-óleo, gases	Syngas (CO, H ₂ , CO ₂), cinzas
Aplicações principais	Agricultura	Geração de biogás (pode ser usado para gerar eletricidade ou calor)	Usinas térmicas a resíduos, queima direta em caldeiras	Usinas de incineração de RSU e resíduos hospitalares	Indústria cimenteira, metalúrgica e termoelétricas	Agricultura, bioenergia, captura de carbono	Geração de energia, produção de hidrogênio e combustíveis sintéticos
Tempo de processo	De semanas a meses	Cerca de 20 a 30 dias	Segundos a minutos	Minutos	Longo (horas)	Minutos a horas	Minutos
Benefícios	Melhoria do solo e redução de resíduos	Geração de energia e produção de fertilizantes			Emissões são menores devido à alta eficiência da combustão e controle de poluentes		
Impacto ambiental			Pode gerar emissões atmosféricas (CO ₂ , NO _x , material particulado)	emissão de CO ₂ , NO _x , dioxinas, furanos, metais pesados e cinzas	Menor impacto devido à transformação no produto final (cimento)		

12 (Bishoge et al., 2019)

13 (Bishoge et al., 2019)

14 (Dieter Mutz, 2017; Turns, 2012; Winterbone, 1997)

15 (Bonner, 1981; Dieter Mutz, 2017; Winterbone, 1997)

16 (Amran et al., 2022; Chatziaras; Psomopoulos; Themelis, 2016)

17 (Li et al., 2020; Zhao et al., 2022)

18 (Bishoge et al., 2019)

Execução



Apoio

