

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO TRATAMENTO
TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NAS BACIAS DOS RIOS
PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ)**

Paloma Tuena Moreira França

Profa. Dra. Maria Luisa Nerys de Moraes Carneiro

Rio Claro (SP)

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

PALOMA TUENA MOREIRA FRANÇA

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO
TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NAS BACIAS DOS RIOS PIRACICABA,
CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ)

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenheira Ambiental.

Rio Claro - SP

2026

F814p

França, Paloma Tuena Moreira

Potencial de geração de energia através do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) /

Paloma Tuena Moreira França. -- Rio Claro, 2026

35 f. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Maria Luisa Nerys de Moraes Carneiro

1. Sustentabilidade. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Resíduos sólidos. 4. Incineração. 5. Produção de energia elétrica. I. Título.

PALOMA TUENA MOREIRA FRANÇA

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO
TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NAS BACIAS DOS RIOS PIRACICABA,
CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ)

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenharia Ambiental.

Comissão Examinadora

Maria Luisa Nerys de Moraes Carneiro (orientadora)

Ademir Abdala Prata Junior

Marcelo Loureira Garcia

Rio Claro, 23 de junho de 2026.

Documento assinado digitalmente
PALOMA TUENA MOREIRA FRANÇA
Data: 06/07/2026 12:01:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) aluno(a)

Documento assinado digitalmente
MARIA LUISA NERYS DE MORAES CARNEIRO
Data: 06/07/2026 12:03:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão à Universidade Estadual Paulista (UNESP), instituição pública de referência que desempenhou papel fundamental na minha formação profissional e pessoal. Graças a experiência que ela proporciona, tive a oportunidade de acessar um ensino de qualidade, desenvolver o pensamento crítico e participar da construção do conhecimento científico, aprendizados imensuráveis para a minha trajetória.

Agradeço à minha orientadora, professora Maria Luisa, pelo acompanhamento, dedicação e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma essencial para a conclusão desta última etapa da graduação. Também agradeço aos membros da banca avaliadora, professores Ademir e Marcelo, por aceitarem o convite e dedicarem parte de seu tempo à análise e discussão da monografia.

Importante mencionar a SABESP, especialmente a equipe do Departamento de Projetos de Tratamento (EPT), pela oportunidade de estágio, que endossou de forma significativa meu desenvolvimento como engenheira ambiental. Graças à companhia, foi possível realizar a visita técnica à URE Barueri, que contribuiu com informações relevantes para a elaboração desta pesquisa. Por isso, também agradeço à Orizon pela receptividade e por abrir as portas de sua instalação, tornando possível essa experiência enriquecedora.

Por fim, nada disso teria sido possível sem o apoio da minha família, meus amigos e minha analista, que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada, independente das circunstâncias. O apoio de cada um foi imprescindível para superar os desafios encontrados no caminho e encerrar esse ciclo da minha vida com muito júbilo.

RESUMO

Tecnologias avançadas de conversão de resíduos em produtos e insumos de valor agregado já são amplamente empregadas em diversos países da Europa e da Ásia. No Brasil, entretanto, a quase totalidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e dos resíduos dos serviços de limpeza pública (RPU) ainda é destinada a aterros sanitários. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição em aterros deve constituir a última alternativa de destinação, priorizando-se a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação de materiais e o aproveitamento energético. Adicionalmente, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) prevê a substituição gradual de aterros sanitários, aterros controlados e lixões por unidades de valorização biológica e energética. Neste contexto, o presente trabalho avalia o potencial de desvio de aterros dos RSU coletados em 76 municípios do Estado de São Paulo por meio de sua conversão em energia elétrica em Unidades de Recuperação Energética (UREs). As UREs foram modeladas como usinas termelétricas baseadas em ciclo Rankine, com capacidade de processamento de 870 toneladas de RSU por dia, considerando um poder calorífico de 7.700 kJ/kg e uma potência elétrica instalada de 20 MW, resultando em uma eficiência de conversão energética de 28%. Os municípios analisados pertencem à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos UGRHI 05, que engloba as bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ). Em 2024, aproximadamente 2,35 milhões de toneladas de RSU, compreendendo resíduos domiciliares e de limpeza pública, foram destinadas a aterros sanitários/controlados nesses municípios. Os resultados indicam que o direcionamento integral desses resíduos para sete UREs, em substituição ao aterramento, permitiria a geração de aproximadamente 1.298 GWh de energia elétrica por ano, valor equivalente ao consumo anual médio de cerca de 500 mil habitantes. Portanto, a produção elétrica específica da incineração de RSU com geração de energia nas Bacias PCJ equivale a 0,55 MWh/t RSU, o que está dentro da faixa estimada pelo Plano Paulista de Energia de 2020 que é 0,4 a 0,6 MWh/t RSU.

Palavras-chave: incineração; valorização energética; aterros; URE; rejeitos.

ABSTRACT

Advanced technologies for converting sanitation-related waste into value-added products and inputs are already widely adopted in several European and Asian countries. In Brazil, however, nearly all municipal solid waste (MSW) and public cleaning waste (PCW) are disposed of in landfills. According to the Brazilian National Solid Waste Policy (PNRS), landfilling should represent the last option for waste management. The PNRS defines environmentally appropriate final disposal as including reuse, recycling, composting, material recovery, and energy recovery. Furthermore, the National Solid Waste Plan (Planares) establishes the progressive replacement of landfills and dumpsites by biological and energy recovery facilities. This study evaluates the landfill diversion potential of MSW collected in 76 municipalities within the state of São Paulo, Brazil, by proposing its conversion into electricity through Waste-to-Energy (WtE) plants. These facilities operate as thermoelectric power plants that generate electricity through waste incineration. Each WtE plant was modeled as a Rankine cycle facility with a processing capacity of 870 tons of MSW per day, assuming a lower heating value of 7,700 kJ/kg and an electrical output of 20 MW, resulting in a conversion efficiency of 28%. The municipalities analyzed are located within the Water Resources Management Unit n.5 (UGRHI 05), that includes the basins of rivers Piracicaba, Campinas, and Jundiaí (PCJ). In 2024, approximately 2.35 million tons of MSW (household and public cleaning waste) generated in these municipalities were sent to landfills. The results indicate that diverting this waste stream to seven WtE plants instead of landfills could generate approximately 1,298 GWh of electricity annually, corresponding to the average yearly electricity consumption of nearly 500,000 inhabitants. Therefore, the specific electricity generation from municipal solid waste (MSW) incineration with energy recovery in the PCJ basin is equivalent to 0.55 MWh per ton of MSW, which falls within the range estimated by the 2020 São Paulo State Energy Plan, namely 0.4 to 0.6 MWh per ton of MSW.

Keywords: incineration; waste-to-energy; landfills; WTE; rejects.

Title: Energy Generation Potential Through the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste in the Piracicaba, Capivari and Jundiaí River Basins (PCJ).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1.	OBJETIVO.....	9
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	9
3	METODOLOGIA	14
3.1.	Área de estudo.....	14
3.2.	Dados provenientes do SINISA	16
3.3.	Estimativa de geração de eletricidade	18
3.4.	Dados operacionais da URE Barueri	19
3.5.	Unidades de Gerenciamento de Resíduos (URs) na UGRHI 05	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1.	Panorama do gerenciamento de resíduos na UGRHI 05	23
4.2.	Quantidade e localização das UREs.....	25
4.3.	Potencial de geração de energi elétrica na UGRHI 05	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS.....	31
	APÊNDICE – RELAÇÃO DE MUNICÍPIOS DA BACIA PCJ E SUA DISTRIBUIÇÃO NAS URS	34

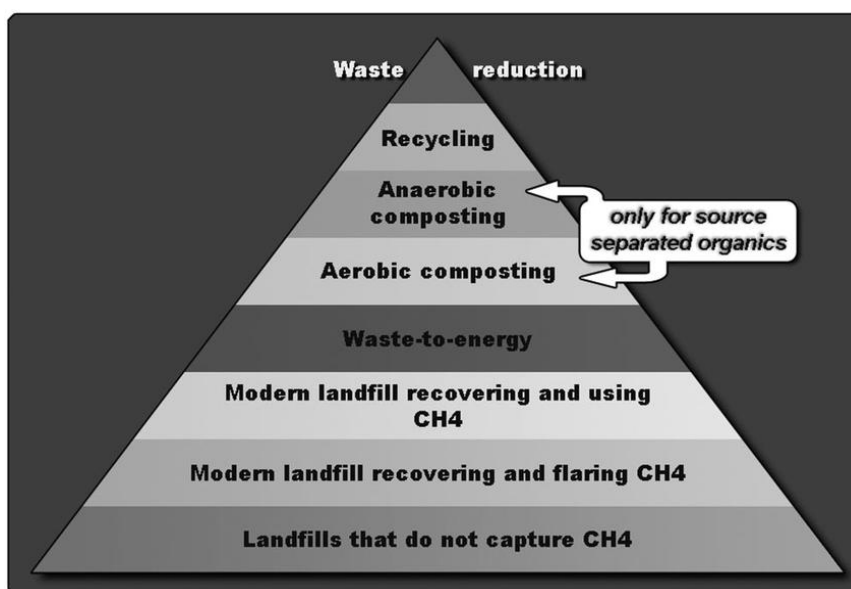
1 INTRODUÇÃO

Segundo o SINISA, em 2024, foram coletados 88,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, que corresponde à 1,14 kg diários por habitante. Frente às 78,2 milhões de toneladas totais e 1,04 kg/hab.dia, em 2023, configura-se um aumento de coleta de aproximadamente 12,7% no total e 9,6% per capita. A redução do índice de desemprego no Brasil em 2024 sugere um aumento do poder de compra da população e, consequentemente, maior geração de RSU (ABREMA, 2025).

Além disso, o relatório estimou um déficit de 7,6% da população nacional que não é contemplada com coleta de resíduos sólidos domiciliares, em 2024, que corresponderia à 18.352,82 t/dia não-coletados, montante provavelmente descartado de maneira incorreta. No mesmo ano, 23,2% dos resíduos sólidos urbanos coletados tiveram sua disposição final de forma ambientalmente inadequada. Ou seja, estima-se que 20,93 milhões de toneladas foram encaminhadas aos 1.761 lixões e aterros controlados existentes no país (SINISA, 2025).

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, define que a destinação final ambientalmente adequada compreende a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, dentre elas a disposição final (art. 3º, inciso VII). Kaufman e Themelis (2009) também determinam que existe uma ordem de prioridade para os processos passíveis de serem adotados na gestão dos resíduos sólidos, como apresentado na Figura 1. A categoria “Waste-to-energy” apresentada na imagem, refere-se à produção de energia térmica ou elétrica a partir da oxidação térmica dos resíduos sólidos urbanos.

Figura 1 – Hierarquia na gestão de resíduos sólidos.



Fonte: Kaufman e Themelis (2009).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), decreto instituído em 2022, estipula diversas metas que deverão ser alcançadas visando o cumprimento da PNRS. Dentre elas inclui-se a implementação de tratamentos alternativos para a diminuição da dependência do país dos aterros sanitários. A Meta 4 do Planares estipula que, até 2040, sejam recuperados 48,1% da massa total de RSU gerados no país, incluindo processos de reciclagem, tratamento biológico e recuperação energética. No contexto das tecnologias de tratamento térmico, a Meta 9 estipula que 30% de toda a massa de RSU desviada da disposição final seja submetida à incineração com recuperação de energia, o que equivale a 14,6% dos RSU gerados em âmbito nacional (Sarno, 2022).

Neste contexto, observa-se que o desenvolvimento e aplicação de novas soluções para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos se faz urgente no Brasil, principalmente nas grandes metrópoles, onde o volume de RSU gerado é cada vez maior. Melhorias na gestão do setor de resíduos sólidos são cruciais, uma vez que este reflete em questões sociais, pela presença de populações cuja subsistência se encontra em lixões e aterros irregulares, econômicas, pois a disponibilidade de terrenos é finita e os aterros impossibilitam o uso da terra por décadas, e ambientais, por oferecer inerentes riscos de contaminação do solo, águas subterrâneas e do ar.

1.1. OBJETIVO

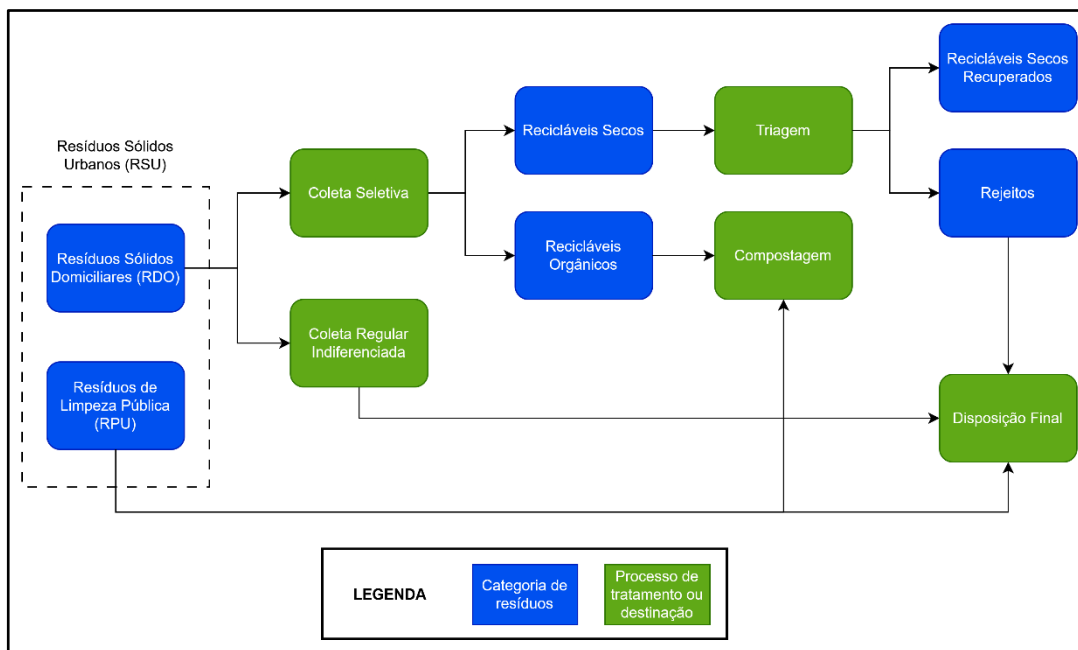
O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados nos 76 municípios da UGRHI 05, que inclui as bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), no Estado de São Paulo, por meio da substituição da disposição em aterros sanitários, aterros controlados e/ou lixões por Unidades de Recuperação Energética (UREs). Busca-se quantificar o potencial de geração de energia elétrica associado à incineração dos resíduos, bem como analisar a contribuição dessa alternativa para o desvio dos rejeitos de aterros, em consonância com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) de 2022.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A presente revisão bibliográfica apresenta os principais conceitos, aspectos legais e estudos relacionados à recuperação energética de resíduos sólidos urbanos por meio da incineração, com ênfase em Unidades de Recuperação Energética (UREs). São abordados o panorama da gestão de resíduos sólidos no Brasil, os fundamentos da recuperação energética, as tecnologias de tratamento térmico e as metodologias empregadas na estimativa do potencial energético de plantas de incineração em massa (“mass burning”). A revisão busca fornecer a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da metodologia adotada e para a discussão dos resultados obtidos.

Dentre as diferentes alternativas tecnológicas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, a recuperação energética por tratamento térmico ou incineração tem recebido crescente atenção em razão de seu potencial de eliminação da toxicidade e reduzir o volume dos resíduos, além de evitar o aterramento. O tratamento térmico com recuperação de energia permite promover o aproveitamento energético dos resíduos, implementando uma economia circular. A recuperação energética consiste no aproveitamento da energia contida nos resíduos por meio de processos capazes de convertê-la em energia térmica e/ou elétrica. Vale ressaltar que tal técnica constitui apenas uma das formas de tratamento aplicáveis aos resíduos que não possuem outras alternativas tecnológicas de reaproveitamento, chamados de rejeitos (Figura 2). Logo, ela não substitui outras possibilidades de recuperação ou tratamento, mas integra a gama de alternativas existentes para uma gestão integrada de RSU.

Figura 2 – Fluxograma do processo de gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.



Fonte: própria (2026).

A incineração em ambiente controlado já é aplicada no Brasil para resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde (RSS) e equipamentos que contenham Bifenilas Policloradas. O processo é realizado em instalações construídas para essa finalidade, que contam com tecnologias modernas de controle de poluição atmosférica e permitem que os rejeitos tenham seu volume e massa reduzidos, além de eliminarem a sua toxicidade, tornando-os química e biologicamente inertes (Sarno, 2022). Dentre as diversas técnicas existentes e em desenvolvimento nesta área do conhecimento, três subtipos se destacam na atualidade:

[...] (i) incineração mass burning, que opera com excesso de oxigênio; (ii) a gaseificação ou Pirólise, que opera com déficit de oxigênio, e (iii) o Mechanical Biological Treatment (MBT), ou Tratamento Mecânico Biológico (TMB), considerado uma solução intermediária, visando a separação dos orgânicos e o preparo de CDR (combustível derivado de resíduos) a ser utilizado como substituto de combustíveis fósseis em fornos industriais ou em usinas WtE (ABREMA e PLASTIVIDA, 2012, apud Tisi et al, 2024, p. 47).

A tecnologia de incineração *mass burning* opera de forma semelhante ao Ciclo Rankine empregado em usinas termelétricas convencionais. Nesse processo, os resíduos sólidos são submetidos à combustão em uma fornalha, liberando energia térmica que é transferida para uma caldeira, onde ocorre a geração de vapor de alta pressão. Esse vapor é direcionado para uma

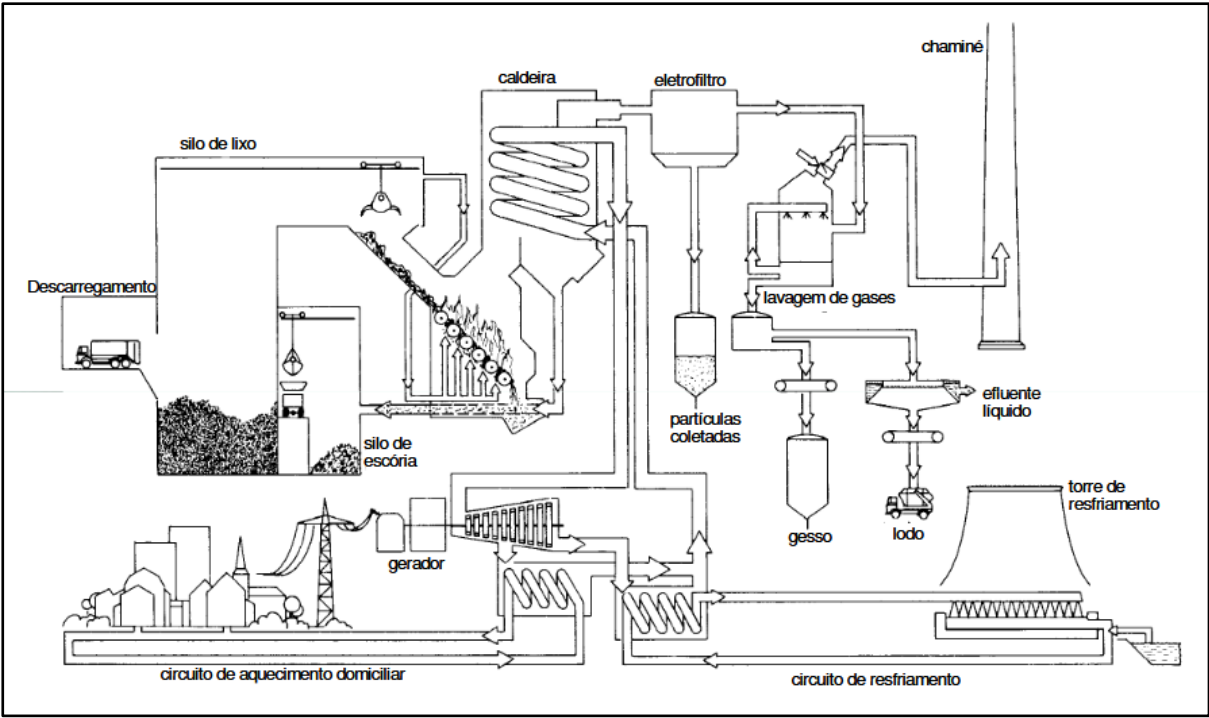
turbina acoplada a um gerador elétrico, possibilitando a conversão da energia térmica em energia elétrica (DALMO et al., 2019).

A recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no Brasil ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento quando comparada a países europeus e asiáticos. Entretanto, observa-se uma expansão gradual dessa tecnologia nos últimos anos, impulsionada por novos empreendimentos em implantação e licenciamento ambiental. Destaca-se a URE Barueri, atualmente em construção e prevista para iniciar sua operação em 2027, considerada o maior projeto de recuperação energética de resíduos do país. Além disso, a recente renovação dos contratos de concessão dos serviços de limpeza urbana do município de São Paulo passou a prever metas de implantação de novas UREs ao longo do período contratual (SÃO PAULO, 2026), alavancando alguns projetos, atualmente em fase de licenciamento ambiental, como da URE Perus.

A operação de sistemas de tratamento térmico de resíduos no Brasil é regulamentada pela Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, que estabelece procedimentos e critérios para o funcionamento dessas instalações, incluindo requisitos de monitoramento ambiental e limites máximos de emissão atmosférica. A norma determina padrões para poluentes como material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), dióxido de enxofre (SO₂), ácido clorídrico (HCl), metais pesados e dioxinas e furanos, visando assegurar a proteção da saúde pública e do meio ambiente. Dessa forma, a implantação de UREs está condicionada ao atendimento de rigorosos critérios de controle ambiental, compatíveis com aqueles adotados internacionalmente para instalações de recuperação energética de resíduos (BRASIL, 2002).

O tratamento térmico com geração de energia pela incineração dos resíduos é a atividade-fim das Unidades de Recuperação Energética (UREs). Elas permitem a geração de energia térmica e elétrica por meio da queima controlada dos resíduos em altas temperaturas em ambiente com excesso de oxigênio. De forma simplificada, o funcionamento de uma URE convencional é apresentado na Figura 3, destacando as principais etapas de combustão dos resíduos, geração de vapor, produção de energia elétrica e tratamento dos gases resultantes do processo.

Figura 3 – Esquema simplificado de funcionamento de uma URE.



Fonte: De Melo (2013).

O Plano Paulista de Energia 2020 (São Paulo, 2012), apresenta o potencial de geração de energia nas UREs em comparação com outros tipos de aproveitamento dos resíduos, conforme mostrado na Figura 4. Como se observa, a produção estimada de energia elétrica ultrapassa as de biogás de aterro (base metano) e a proveniente da digestão anaeróbica acelerada (biodigestores) somadas. A eficiência do processo de recuperação energética depende de fatores como a composição gravimétrica do resíduo, sua parcela de matéria orgânica, umidade e poder calorífico dos materiais.

Figura 4 – Potencial de produção de energia elétrica por incineração de RSU comparado a outros tratamentos.

Tipo de Aproveitamento	Produção de energia elétrica
Biogás de aterro (base metano)	0,1 - 0,2 MWh/t RSU
Digestão anaeróbica acelerada	0,1 - 0,3 MWh/t RSU
Incineração RSU com geração de energia	0,4 - 0,6 MWh/t RSU
Ciclo combinado RSU + gás natural	0,8 - 0,9 MWh/t RSU

Fonte: Secretaria de Energia do Estado de São Paulo - SEE

Fonte: São Paulo (2012).

Dalmo et al. (2019) estimaram o potencial de geração elétrica por incineração para os municípios do Estado de São Paulo. Os autores adotam um modelo baseado na composição gravimétrica e no poder calorífico inferior (PCI) dos RSU do município de Santo André como dado de referência, calculando o PCI médio ponderado das frações combustíveis dos resíduos e aplicando uma eficiência térmica de 25% para plantas de incineração. O modelo considera ainda 8.000 horas anuais de operação, descontando paradas para manutenção, e exclui a fração inerte dos resíduos do cálculo da massa combustível.

Em uma abordagem distinta, Cunha e Carvalho (2021) analisaram a aplicação da tecnologia de gaseificação em leito fluidizado para o tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) e geração de energia elétrica em uma usina termoquímica em implantação no município de Boa Esperança (MG). Por meio de um estudo de caso, os autores compararam a gaseificação com outras tecnologias de recuperação energética, como a incineração e a pirólise, concluindo que a rota adotada apresenta potencial para atender simultaneamente aos aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais envolvidos na gestão dos resíduos. Os resultados evidenciam a recuperação energética como alternativa capaz de reduzir passivos ambientais e contribuir para a diversificação da matriz energética.

Já Leme (2010) avaliou diferentes alternativas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética, utilizando a metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV) em um estudo de caso realizado no aterro sanitário de Betim (MG). Foram comparados cenários envolvendo aterro sanitário convencional, aproveitamento energético do biogás e incineração com geração de eletricidade. Os resultados indicaram que as alternativas com recuperação energética apresentaram desempenho ambiental superior ao aterro sem aproveitamento energético, destacando-se a incineração como a opção mais favorável entre os cenários avaliados.

Sob outra perspectiva, Holanda e Balestieri (2008a) investigaram a aplicação da incineração de resíduos sólidos urbanos em sistemas de cogeração de energia, com foco na seleção de rotas de tratamento de gases de exaustão. Os autores desenvolveram um modelo de otimização que considera simultaneamente aspectos econômicos e ambientais, demonstrando que a eficiência e a viabilidade da recuperação energética por incineração dependem diretamente da adoção de sistemas adequados de controle das emissões atmosféricas.

Em estudo complementar, Holanda e Balestieri (2008b) avaliaram sistemas de cogeração baseados em ciclos combinados gás-vapor associados à incineração de resíduos sólidos urbanos. A pesquisa analisou diferentes estratégias de controle de poluentes atmosféricos, considerando custos de implantação, operação e impactos ambientais. Os resultados apontaram que a integração entre recuperação energética e tecnologias de controle de emissões pode elevar a eficiência dos sistemas e reduzir os impactos ambientais associados à valorização energética dos resíduos.

Padilha e Mesquita (2022) analisaram o efeito das tecnologias de recuperação energética na gestão de RSU em municípios de pequeno porte no Brasil, avaliando as rotas de biogás de aterro, digestão anaeróbia e incineração. Os autores concluem que a incineração isolada não se mostra viável financeiramente para pequenas cidades, enquanto o biogás de aterro, a digestão anaeróbia e a reciclagem representam alternativas mais adequadas a esse perfil municipal. Tal conclusão converge para a ideia de que, para municípios de pequeno porte, o agrupamento regional apresenta maior viabilidade econômica.

Não foi encontrado na literatura nenhum outro trabalho que aborde uma análise da tecnologia *waste-to-energy* aplicada a resíduos sólidos urbanos de um conjunto de municípios no contexto de uma UGRHI. O presente trabalho traz pela primeira vez uma estimativa regional da produção de eletricidade na UGRHI 05 a partir do tratamento térmico em UREs dos RSU provenientes da coleta municipal indiferenciada e dos rejeitos das usinas de triagem de recicláveis.

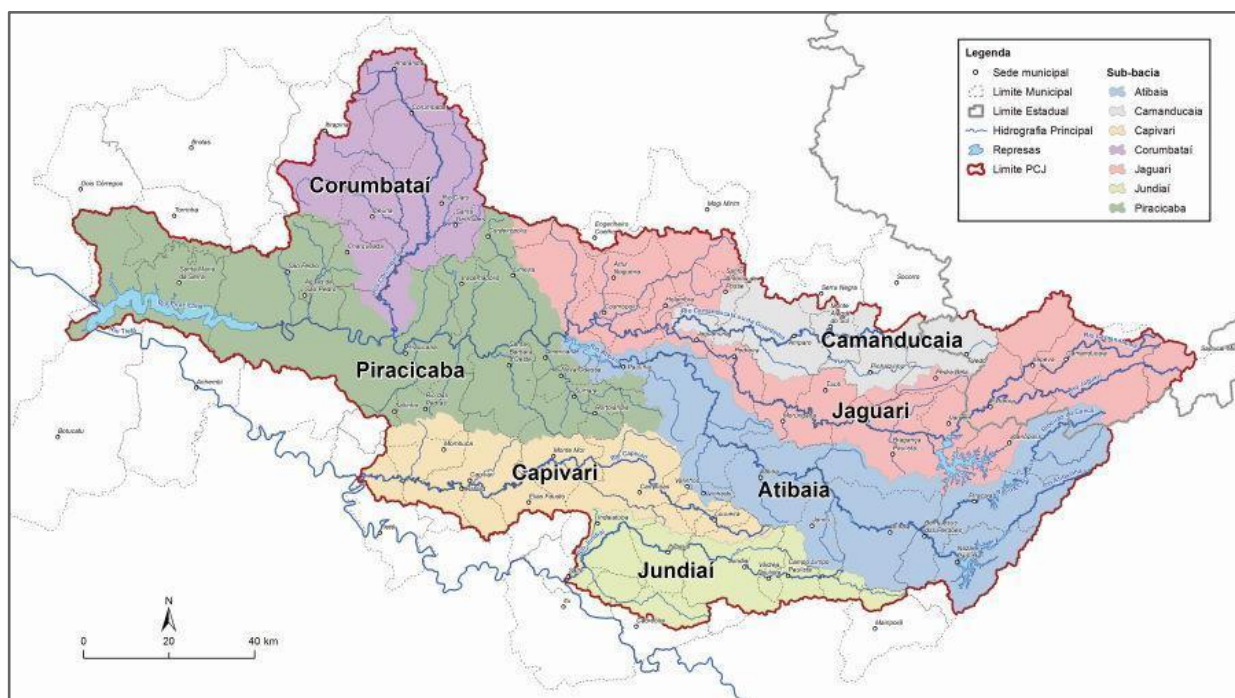
3 METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa abrange os 76 municípios da UGRHI 05 (bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - PCJ), distribuídos sobre um território de 15.377,81 km², sendo 92,45% no estado de São Paulo e 7,55% no estado de Minas Gerais (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2020).

Os limites das Bacias PCJ estão mostrados na Figura 5.

Figura 5 – Mapa da área de estudo: Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).



Fonte: Fundação Agência das Bacias PCJ (2026).

A região possui expressiva ocupação urbana, industrial e rural, é servida por densa malha rododiferroviária e apresenta notáveis indicadores de desenvolvimento econômico, respondendo por cerca de 7% do PIB nacional (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2020). A população total dos municípios somava 5,73 milhões de habitantes em 2018, com taxa de urbanização de 95,1% (ANA, 2018). Esse perfil de alta urbanização e densidade econômica resulta em expressiva geração de resíduos sólidos urbanos, tornando a região particularmente relevante para estudos sobre alternativas à disposição final em aterros.

Os municípios apresentam grande variação de porte: o maior deles, Campinas, contava com aproximadamente 1,1 milhão de habitantes, seguido por Jundiá, com 369 mil, e Piracicaba, com 363 mil habitantes (ANA, 2018). Os demais municípios são majoritariamente de pequeno e médio porte. Essa heterogeneidade na geração de resíduos foi determinante para a abordagem metodológica adotada neste trabalho, baseada no agrupamento dos municípios, conforme descrito no item 4.2.

3.2. Dados provenientes do SINISA

O Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) foi instituído pelo art. 53 da Lei nº 11.445/2007, com o objetivo de coletar e sistematizar dados relativos à prestação dos serviços públicos de saneamento básico no Brasil (BRASIL, 2007). Sua criação oficializou as atividades do então Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), responsável pela coleta e divulgação de informações sobre saneamento básico desde 1995. Posteriormente, com a atualização do Marco Legal do Saneamento pela Lei nº 14.026/2020, o SINISA passou a suceder oficialmente o SNIS como portal de informações, entrando em vigor oficialmente em 2024.

Sua base de dados é composta por dados primários, oriundos da autodeclaração dos municípios, através do preenchimento de formulários de coleta do sistema. As informações de geração e destinação de RSU dos 76 municípios da UGHRI 05 foram obtidos dos relatórios de 2025 do SINISA, com ano de referência de 2024. Três municípios não participaram da pesquisa nesse ano, sendo adotadas as informações do ano-base mais recente disponível na plataforma: 2023 para Engenheiro Coelho e Sapucaí-Mirim, e 2022 para Ipeúna.

O SINISA organiza os dados de acordo com as diretrizes da PNRS, agrupando as quantidades coletadas de resíduos sólidos em categorias que, em conjunto, compõem os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Os RSU são formados por duas grandes frações:

- Resíduos Domiciliares e Assemelhados (RDO), que incluem:
 - Coleta indiferenciada domiciliar: resíduos domésticos coletados sem separação prévia, de forma direta (porta a porta) ou indireta (pontos de entrega voluntária);
 - Coleta seletiva de recicláveis secos: papéis, plásticos, metais e vidros coletados de forma separada, de forma direta ou indireta;
 - Coleta seletiva de orgânicos: restos de alimentos e resíduos de jardim coletados separadamente.
- Resíduos de Limpeza Pública (RPU), que incluem:
 - Limpeza urbana: resíduos de varrição de vias, limpeza de logradouros e lixeiras públicas;
 - Podas e galhadas: resíduos de áreas verdes públicas, registrados separadamente apenas quando há controle exclusivo de peso desse fluxo;

- Resíduos de construção civil (RCC) e volumosos de pequenos geradores: entulhos de reformas e demolições de pequeno porte (até 1 m³) e resíduos volumosos como móveis e eletrodomésticos. Embora os RCC sejam classificados pela PNRS como categoria distinta dos RSU, os provenientes de pequenos geradores são de responsabilidade municipal e, portanto, integram a contabilidade do sistema de limpeza urbana reportada ao SINISA.

O SINISA registra também o tipo de unidade receptora para cada rota de coleta cadastrada, contemplando as seguintes destinações: aterro sanitário, aterro controlado, lixão ou vazadouro, unidade de triagem (galpão ou usina), unidade de compostagem, unidade de manejo de resíduos de áreas verdes (galhadas e podas), Área de Transbordo e Triagem de resíduos da construção civil e volumosos (ATT), unidade de coprocessamento, unidade de incineração, aterro de inertes e unidade de transbordo.

Para fins deste estudo, foram consideradas como disposição final apenas as rotas com destinação a aterros sanitários, aterros controlados e lixões, por constituírem as formas de disposição direta no solo sem aproveitamento da fração energética dos resíduos, representando, portanto, o insumo potencial para uma URE. As demais destinações — como unidades de triagem, compostagem, coprocessamento e aterros de inertes — foram excluídas dessa contabilização, seja por já contemplarem alguma forma de aproveitamento material ou energético, seja por se referirem a frações de resíduos não adequadas para incineração, como os RCC.

A partir da análise e tratamento dos dados obtidos dos relatórios do SINISA, foram criadas e adotadas as seguintes variáveis dos 76 municípios das Bacias PCJ:

- M1 — Massa total anual de RSU coletados (t/ano): somatório das rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares (RDO) e de resíduos sólidos de limpeza urbana (RPU);
- SC — Massa total anual de recicláveis secos coletados (t/ano): proveniente das rotas de coleta seletiva de recicláveis secos. Municípios que destinam esses resíduos para mais de uma unidade de triagem tiveram os valores de todas as rotas somados;
- SR — Massa total anual de recicláveis secos recuperados (t/ano): parcela efetivamente recuperada em relação ao total coletado nas rotas de secos;
- RE — Massa total anual de rejeitos da coleta seletiva (t/ano): parcela não recuperada no processo de triagem, encaminhada à disposição final;

- OR — Massa total anual de recicláveis orgânicos coletados e recuperados (t/ano): proveniente das rotas de coleta seletiva orgânica. O SINISA assume que toda a fração coletada nessa categoria é encaminhada para compostagem e integralmente recuperada, não sendo considerada uma categoria de rejeito;
- DF — Massa total anual destinada à disposição final (t/ano)¹: quantidade de resíduos encaminhados a aterros sanitários, controlados ou lixões. Esta parcela inclui os coletados na coleta indiferenciada e o refugo das usinas de triagem de recicláveis secos. Essa variável será utilizada para o cálculo da estimativa de geração de energia.

A partir dessas variáveis, foram calculados os seguintes parâmetros:

- RR — Massa total de recicláveis recuperados (t/ano): somatório de SR e OR.

3.3. Estimativa de geração de eletricidade

Para o dimensionamento do potencial de geração de energia elétrica a partir da incineração dos resíduos destinados à disposição final, foi utilizada a Equação 1:

$$E = \frac{Q \times PCI \times \eta}{3600} \quad (1)$$

Em que:

- E : energia elétrica gerada (MWh/ano);
- Q : massa de resíduos processados (t/ano);
- PCI : poder calorífico inferior do resíduo (MJ/t);
- η : eficiência de conversão da energia térmica em elétrica na planta (adimensional);
- 3600 segundos por hora.

Os valores de PCI e eficiência elétrica adotados foram obtidos a partir das premissas operacionais da URE Barueri, conforme detalhado no item 4.3. Para fins de comparação do potencial energético estimado, foi adotado o consumo médio per capita de energia elétrica residencial de 2.640 kWh/ano (EPE, 2025), permitindo estimar o consumo total de cada

¹ DF inclui tanto a massa coletada no município de origem ou em outro município.

município da área de estudo, multiplicando pelo número de habitantes. O relatório do SINISA apresenta os dados da população dos municípios, a fonte é do IBGE, 2024.

3.4. Dados operacionais da URE Barueri

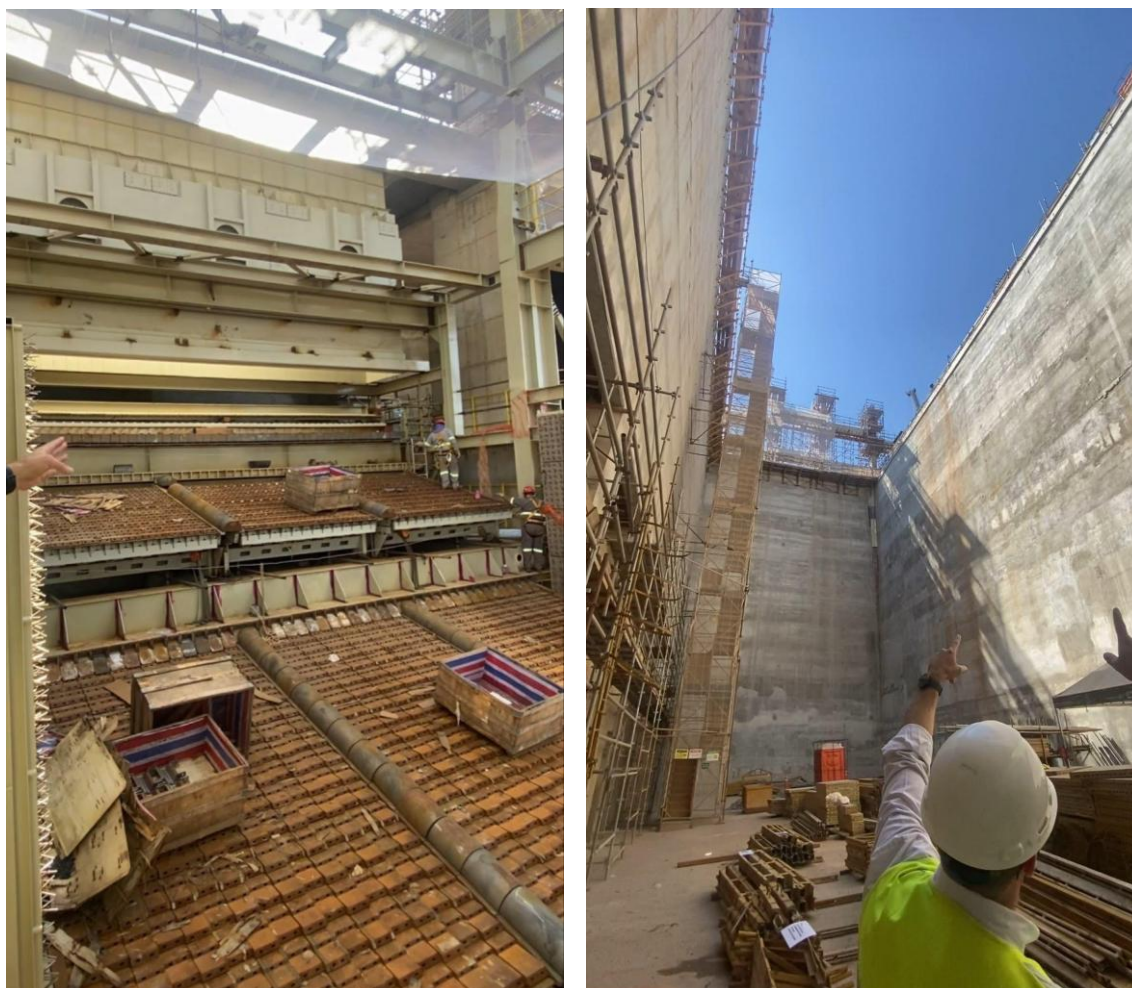
Os parâmetros operacionais adotados como premissa neste trabalho foram obtidos a partir de visita técnica realizada à URE Barueri, o único empreendimento de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos de grande porte em implantação no estado de São Paulo e considerado o primeiro do gênero no Brasil. A visita possibilitou o contato direto com aspectos construtivos, operacionais e tecnológicos do sistema (Figura 6 e 7), bem como com os parâmetros técnicos utilizados no dimensionamento da planta.

Figura 6 – Obras da URE Barueri durante visita técnica realizada em 2026.



Fonte: Acervo da autora (2026).

Figura 7 – Instalações internas da URE Barueri em fase de implantação: à esquerda, estrutura da caldeira; à direita, bunker destinado ao armazenamento dos resíduos sólidos urbanos.



Fonte: Acervo da autora (2026).

O empreendimento encontra-se atualmente em fase de obras, com previsão de comissionamento em outubro de 2026 e operação comercial a partir de fevereiro de 2027. Embora esteja localizado fora da área de estudo delimitada, sua adoção como referência se justifica por ser o caso mais aderente à realidade regional paulista, considerando as características dos resíduos sólidos urbanos gerados no estado. Dessa forma, as estimativas de potencial energético desenvolvidas neste trabalho foram baseadas nas premissas técnicas da URE Barueri, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais da URE Barueri.

Parâmetro	Valor	Unidade
Capacidade de processamento	870	t/dia
Poder calorífico inferior médio (PCI)	7.100	kJ/kg
Potência nominal	20	MW
Dias de operação	358	dias/ano

Fonte: URE Barueri (2026).

Segundo as informações obtidas na visita técnica à URE Barueri, estão previstas manutenções com parada durante uma semana por ano. Portanto, estima-se a operação da planta durante 358 dias por ano, o que corresponde a um fator de disponibilidade de 98%. Considerando a capacidade de processamento de 870 t/dia, foi possível calcular a capacidade anual da unidade:

$$Q_a = Q_d \times n \quad (2)$$

Em que:

- Q_a : capacidade anual de processamento (t/ano);
- Q_d : capacidade diária de processamento (t/dia);
- n : número de dias de operação no ano (dias).

A partir dos dados fornecidos, também foi possível calcular a eficiência do sistema:

$$P_t = \frac{Q \times PCI}{3600} \quad (3)$$

Em que:

- P_t : potência térmica disponível nos resíduos (MW);
- Q : fluxo de massa de resíduos processados (t/ano);
- PCI : poder calorífico inferior da fração residual (MJ/t);
- 3600 segundos por hora.

E então:

$$\eta = \frac{P_e}{P_t} \quad (4)$$

Em que:

- P_t : potência térmica disponível nos resíduos (MW);
- P_e : potência elétrica gerada (MW);
- η : eficiência global da transformação termelétrica (adimensional).

Os parâmetros operacionais calculados a partir de informações obtidas na visita técnica, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros operacionais calculados a partir dos dados da visita à URE Barueri.

Parâmetro	Valor	Unidade
Fator de disponibilidade	98	%
Vazão anual	311.460	t/ano
Poder calorífico inferior (PCI)	7.100	MJ/t
Eficiência térmica do ciclo termodinâmico	28	%

Fonte: própria, a partir dos dados da URE Barueri (2026).

3.5. Unidades de Gerenciamento de Resíduos (URs) na UGRHI 05

Calculou-se o parâmetro DF de cada município e foram sendo somados os DFs de municípios adjacentes até atingir 870 t/dia (ou 311.460 t/ano), que é a capacidade da URE Barueri. A este agrupamento de municípios denominou-se UR – Unidade de Gerenciamento de Resíduos. Desta forma, procedeu-se o agrupamento dos 76 municípios da UGRHI 05 (Bacias PCJ) em sete URs, onde cada uma comporta uma única usina de Recuperação Energética de Resíduos (URE) com capacidade mínima de 870 t/dia. Esta metodologia teve como premissa agrupar municípios vizinhos a fim de minimizar custos de transporte e aumentar a escala de processamento das UREs. A localização específica da URE dentro da UR foi adotada como um ponto arbitrário no interior do maior município.

A representação espacial das URs e as localizações das respectivas UREs foi elaborada em mapa desenvolvido no software ArcGIS Pro (Esri). Os limites municipais foram obtidos a

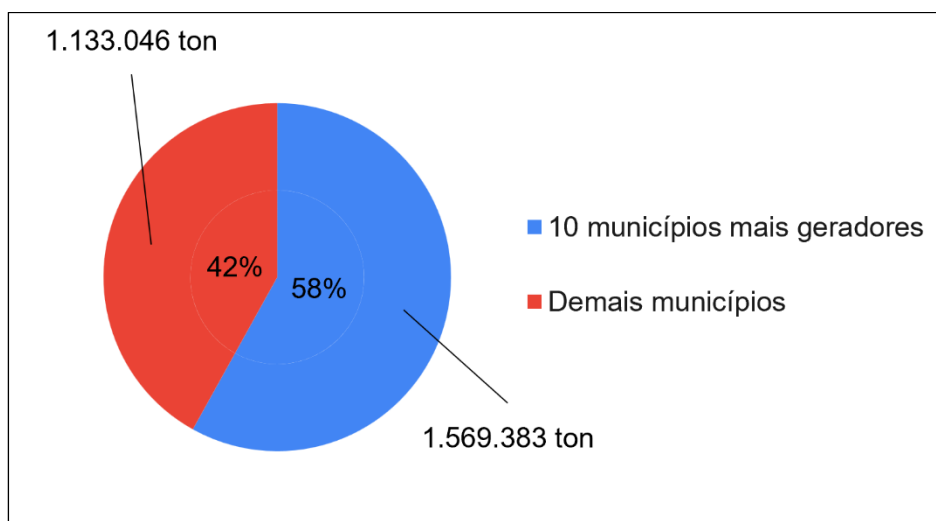
partir das malhas territoriais de 2010 disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e utilizados como base cartográfica para a delimitação das áreas de abrangência de cada URE. A simbologia e o *layout* do mapa foram configurados no próprio ambiente do ArcGIS Pro, com exportação do produto em arquivo *.jpeg* (v. seção 5.2).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Panorama do gerenciamento de resíduos na UGRHI 05

O gráfico 1 mostra os municípios com maior geração na UGRHI 05 em 2024. Os dez maiores geradores contribuíram com mais 1,5 milhão de toneladas de RSU enviados para aterramento, o que corresponde a aproximadamente 58% do total de resíduos gerados na UGRHI. Os cinco maiores geradores são: Campinas, Jundiaí, Piracicaba, Indaiatuba e Limeira, com gerações individuais de até 0,5 milhão t/ano.

Gráfico 1 – Contribuição dos municípios mais geradores de RSU em 2024 na UGRHI 05.



Fonte: própria (2026).

O gráfico 2 mostra os tipos de destinação de RSU que ocorrem nos municípios da UGRHI 05. Como se observa, 87% dos resíduos coletados são encaminhados à disposição final em aterros sanitários ou controlados, 11% recebem outras destinações e apenas 2% correspondem à recicláveis, secos ou orgânicos, efetivamente recuperados (RR). A categoria "outras destinações" foi criada para englobar os resíduos que tiveram destinações diferentes de aterros controlados, sanitários e lixões, por não serem objeto de interesse do processo de reaproveitamento em UREs.

Gráfico 2 – Distribuição dos tipos de destinação dos resíduos nas Bacias PCJ.



Fonte: própria (2026).

Dos 76 municípios da UGRHI², obteve-se que 56 destinam seus resíduos a aterros localizados em outros municípios, sendo que sete deles utilizam mais de um município receptor. Isto indica que as municipalidades já incorrem em custos de transporte intermunicipal de RSU, o que pode favorecer a viabilidade logística de um modelo regionalizado de destinação dos resíduos às UREs.

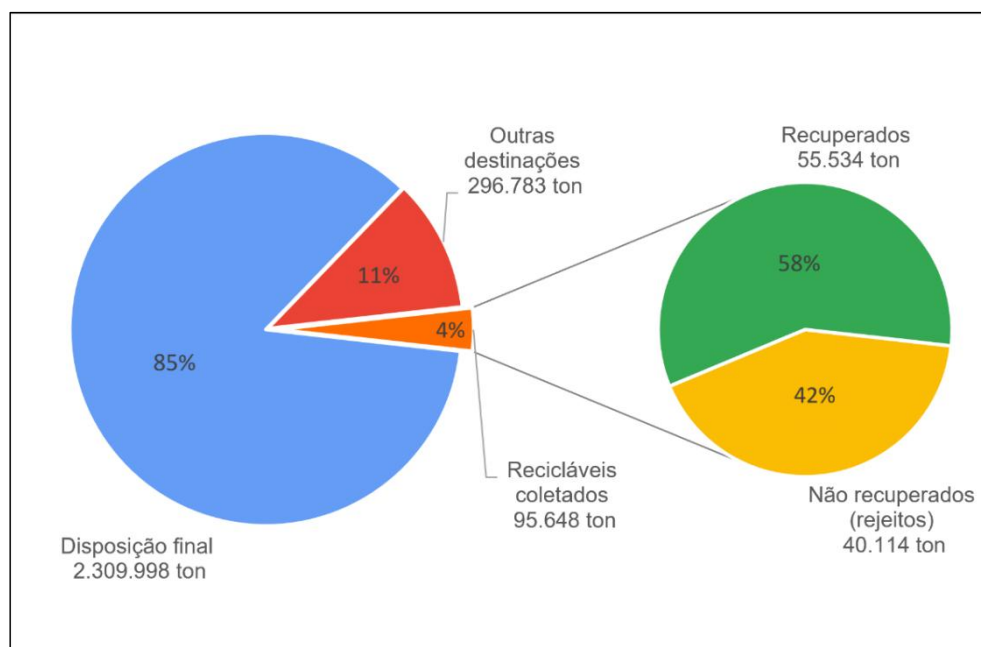
Apenas Jundiaí, Itu e Cabreúva realizam a destinação de RSU em aterros controlados — sendo Jundiaí o único a encaminhar seus resíduos a uma unidade deste tipo fora de seu próprio território, em Santana de Parnaíba. Conforme já discutido, essa categoria de disposição não configura a forma ambientalmente mais adequada segundo a PNRS (BRASIL, 2010), e esses três municípios apresentam, portanto, passivo ambiental relevante no que diz respeito à destinação final de seus resíduos.

O Gráfico 3 mostra a distribuição dos tipos de destinação de RSU nos municípios da UGRHI 05. Como se observa, 85% dos RSU são enviados para disposição final, sem aproveitamento, e 4% são coletados seletivamente e enviados para unidades de recuperação de secos ou orgânicos. Da fração de recicláveis coletados seletivamente, 58% são efetivamente

² Engenheiro Coelho e Sapucaí-Mirim não dispõem de informações sobre tipo de destinação final registradas nos relatórios mais recentes do SINISA, tendo sido excluídos dessa análise.

recuperados, enquanto os 42% restantes são rejeitos que retornam para disposição final. Somente dois municípios realizam coleta seletiva de orgânicos, Paulínia e Socorro, destinando-os para compostagem.

Gráfico 3 – Distribuição das destinações finais de resíduos em 2024 na UGRHI 05.



Fonte: própria (2026).

4.2. Quantidade e localização das UREs

A aplicação da metodologia na UGRHI 05 resultou em 2,35 milhões de toneladas de RSU distribuídos em sete unidades de gerenciamento de resíduos (URs), com uma URE cada. A Tabela 3 mostra os quantitativos do parâmetro DF (tonelagens destinadas para aterramento) em cada UR e os municípios que as compõem.

A UR 1 é composta pelo município de Campinas e outros dois municípios. Esta unidade de gerenciamento recebe a maior quantidade de resíduos da UGRHI, aproximadamente 585 mil ton/ano. As URs 2 a 7 receberam em média 294 mil ton/ano cada uma. Essa configuração indica que a regionalização proposta buscou equilibrar a capacidade das instalações, evitando diferenças excessivas de porte entre as plantas e favorecendo a padronização dos projetos. Como se observa, a UR 5 e a UR 7 são as unidades de gerenciamento com o maior número de municípios agrupados, 19 e 20, respectivamente. Uma aglomeração maior de municípios implica a necessidade de coordenação entre um número mais elevado de administrações

municipais, o que tende a aumentar a complexidade institucional para a implementação de soluções consorciadas.

Tabela 3 – Agrupamentos municipais propostos para implantação das UREs.

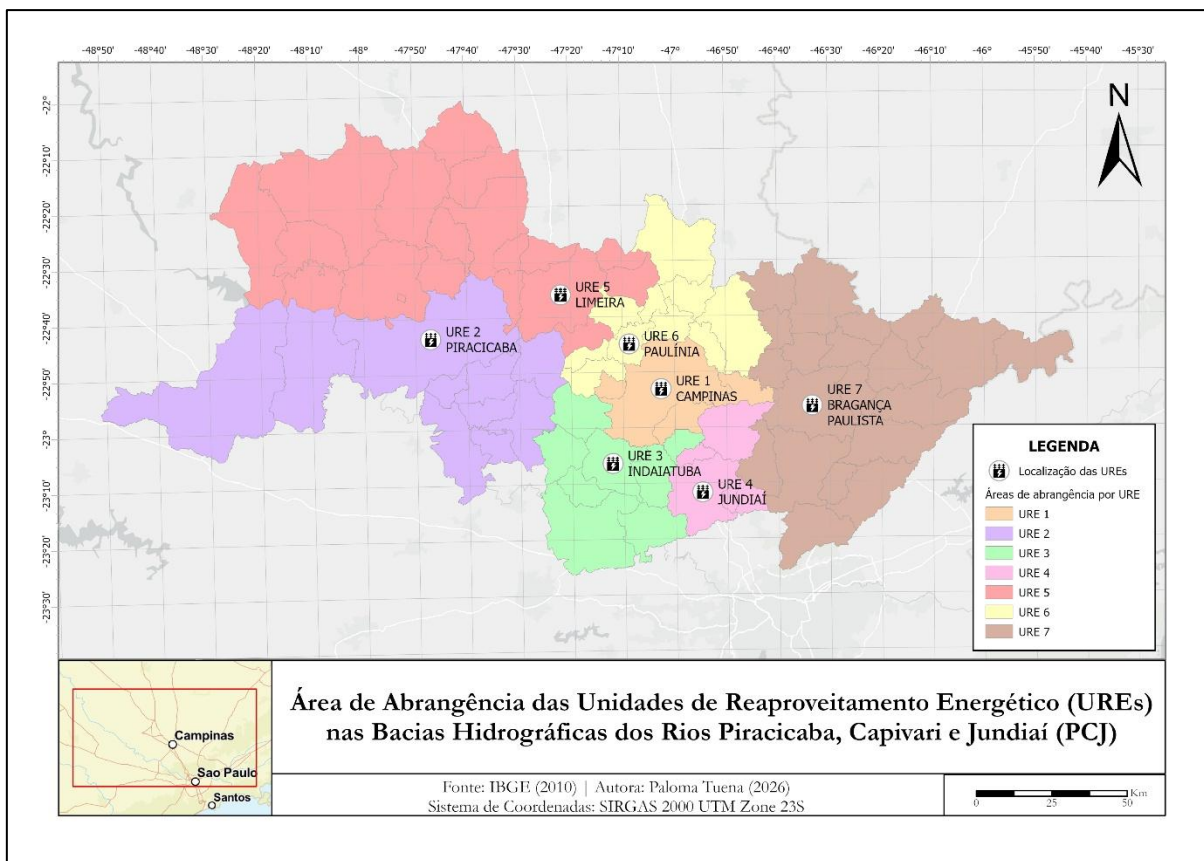
UR	Município principal	Municípios participantes¹	Número de municípios na UR	Massa de resíduos destinada para aterramento (DF, t/ano)
1	Campinas	1 ao 4	4	585.013
2	Piracicaba	5 ao 14	10	303.558
3	Indaiatuba	15 ao 22	8	288.033
4	Jundiaí	23 ao 27	5	292.105
5	Limeira	28 ao 46	19	302.922
6	Paulínia	47 ao 56	10	290.506
7	Bragança Paulista	57 ao 76	20	287.974
	TOTAL	76	76	2.350.112

¹ Relação completa dos municípios integrantes de cada agrupamento apresentada no Anexo 1.

Fonte: própria (2026).

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial das sete usinas de recuperação energética (UREs) na UGHRI 05. Como mencionado anteriormente, a localização específica de cada URE representada no mapa não deve ser interpretada como um parâmetro relevante da análise. O mapa possui caráter meramente ilustrativo e tem como finalidade indicar um ponto de referência arbitrariamente definido no município de maior geração de resíduos da UR, não correspondendo, portanto, à localização efetiva ou otimizada das usinas.

Figura 8 – Mapa de localização das UREs propostas nas Bacias PCJ.



Fonte: própria (2026).

4.3. Potencial de geração de energia elétrica na UGRHI 05

A aplicação da metodologia permitiu calcular a capacidade de geração anual de energia elétrica de cada URE com base na eficiência térmica de conversão dos resíduos em eletricidade, 28% e no PCI dos resíduos, 7,7 MJ/kg. A Tabela 4 mostra a quantidade de energia elétrica gerada em cada URE em MWh/ano para os respectivos quantitativos mássicos considerados (parâmetro DF, toneladas/ano). Em média, cada tonelada de resíduos resulta em aproximadamente 0,55 MWh de eletricidade.

À exceção de Campinas, as UREs apresentam capacidades bastante próximas, entre aproximadamente 790 e 830 t/dia de resíduos. Essa faixa de capacidade é compatível com empreendimentos de médio porte encontrados internacionalmente e pode representar um compromisso entre obtenção de economias de escala, redução das distâncias médias de transporte dos resíduos, maior facilidade de implantação em comparação com instalações de capacidade muito elevada. Essa homogeneidade também pode favorecer a padronização dos equipamentos e dos custos de implantação e operação.

Tabela 4 – Potencial de geração de energia elétrica por URE.

URE	Município sede	Massa de resíduos destinada para aterramento (DF, t/ano)	Energia elétrica gerada na URE (MWh/ano)	Potência nominal (MW)
1	Campinas	585.013	323.058	36,88
2	Piracicaba	303.558	167.631	19,14
3	Indaiatuba	288.033	159.059	18,16
4	Jundiaí	292.105	161.307	18,41
5	Limeira	302.922	167.280	19,10
6	Paulínia	290.506	160.424	18,31
7	Bragança Paulista	287.974	159.025	18,15
	TOTAL	2.350.112	1.297.784	148,15

Fonte: própria (2026).

Embora Campinas concentre a maior URE do sistema, sua participação representa cerca de 25% da capacidade total instalada. Isso demonstra que a proposta não depende excessivamente de uma única instalação, distribuindo a capacidade de processamento entre diferentes polos regionais. Essa descentralização tende a aumentar a resiliência operacional do sistema e reduzir riscos associados à indisponibilidade temporária de uma única planta.

Os resultados consolidados do potencial de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos na UGRHI 05 são apresentados na Tabela 5. As sete UREs propostas permitiriam a geração de uma potência expressiva, aproximadamente 1.298 GWh de energia elétrica por ano ou 148 MW_e, o que representa a capacidade de uma termelétrica convencional de médio porte. Esse montante corresponde ao consumo anual médio de aproximadamente 492 mil habitantes, o que corresponde a aproximadamente 7% da demanda energética da UGRHI.

Tabela 5 – Resultados consolidados sobre o aproveitamento energético na UGRHI 05.

Parâmetro	Valor	Unidade
Resíduos destinados à disposição final (DF)	2.350.112	t/ano
Potencial de geração de energia elétrica	1.297.784	MWh/ano
Produção de energia elétrica específica	0,55	MWh/t RSU

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência nominal total	148	MW
Habitantes atendidos ¹	491.584	hab
Participação na demanda elétrica regional	7,11	%

¹ Considerando consumo médio per capita de 2.640 kWh/hab·ano (EPE, 2025);

Fonte: própria (2026)

Neste estudo, os resultados evidenciam o potencial do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos como fonte complementar para a matriz energética regional. Além da geração de eletricidade, a implantação das UREs possibilitaria o desvio de aproximadamente 2.350.112 toneladas de resíduos sólidos atualmente destinadas a aterros sanitários, reduzindo em 100% o volume de resíduos aterrados na área de estudo.

Tal cenário contribuiria significativamente para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), além de reduzir a demanda por novas áreas de disposição final e os impactos ambientais associados, como emissões fugitivas de metano e produção de lixiviados, promovendo uma gestão mais sustentável dos resíduos urbanos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstraram que aproximadamente 2,35 milhões de toneladas de resíduos são encaminhadas anualmente à disposição final nos municípios das Bacias PCJ, correspondendo a cerca de 87% dos RSU coletados. Considerando a distribuição territorial dos municípios e os quantitativos de resíduos gerados em 2024, estimou-se a necessidade de implantação de sete UREs com características equivalentes às da URE Barueri. Cada unidade foi considerada com capacidade de processamento de 870 toneladas de RSU por dia, poder calorífico médio de 7,7 MJ/kg e potência elétrica instalada de 20 MW. Nessas condições, as sete unidades poderiam gerar aproximadamente 1.298 GWh de energia elétrica por ano, montante equivalente ao consumo anual médio de cerca de 492 mil habitantes e correspondente a aproximadamente 7,1% da demanda residencial estimada para a população da área de estudo.

Os resultados obtidos também evidenciam a relevância dessa alternativa no contexto das metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), que prevê a expansão da recuperação energética de resíduos no país. Considerando as características

adotadas neste estudo, sete UREs somariam a potência instalada de 160 MW, enquanto a meta nacional é de 994 MW até 2040, equivalente a cerca de 50 instalações semelhantes à esta.

Entretanto, embora o potencial técnico identificado seja expressivo, a viabilidade da implantação de UREs em larga escala no Brasil depende de fatores que extrapolam o escopo desta pesquisa. Aspectos econômicos, regulatórios, logísticos, ambientais e sociais exercem papel determinante na implementação desses empreendimentos. Entre os principais desafios destacam-se os elevados investimentos iniciais, os custos operacionais e de transporte dos resíduos, os mecanismos de remuneração da energia gerada, os processos de licenciamento ambiental e a aceitação pública da tecnologia. Além disso, a avaliação da recuperação energética deve ser realizada considerando alternativas prioritárias previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos para o gerenciamento de RSU, como a ampliação da reciclagem, do tratamento da fração orgânica e outras formas de valorização dos resíduos.

Conclui-se, portanto, que a recuperação energética por incineração dos resíduos sólidos urbanos constitui uma alternativa promissora para complementar o modelo atualmente predominante de disposição em aterros sanitários na região das Bacias PCJ. Além de contribuir para a diversificação da matriz energética e para a geração de eletricidade a partir de uma fonte local e contínua, essa tecnologia pode reduzir a dependência de novas áreas para disposição final e promover a valorização de resíduos que atualmente são destinados sem qualquer aproveitamento energético. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se o desenvolvimento de estudos mais aprofundados de viabilidade técnico-econômica, logística e ambiental, de modo a subsidiar a tomada de decisão e a eventual implantação das UREs propostas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. *Plano das Bacias PCJ 2020–2035*. Disponível em: <https://plano.agencia.baciaspcj.org.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012*. São Paulo: ABRELPE, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2025*. São Paulo: ABREMA, 2025. Disponível em: <https://abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 16 jun. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). *Bacias PCJ — Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí*. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planos-de-recursos-hidricos/planos-de-recursos-hidricos-de-bacias-hidrograficas/planos-de-bacias-hidrograficas-interfederativas/pcj>. Acesso em: 5 jun. 2026.

BRASIL. 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: seção 1, Brasília, DF, n. 224, p. 92–95, 20 nov. 2002.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.036, de 11 de maio de 1990, nº 8.666, de 21 de junho de 1993, nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm. Acesso em: 23 maio 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 22 jun. 2026.

CUNHA, Diogo Alves; CARVALHO, Laisa Cristina. *Tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) com vistas à geração de energia: estudo de caso em usina*

termoquímica em fase de implantação em Boa Esperança - MG. Revista Científica da Faculdade Unis, Varginha, v. 11, n. 1, p. 1-20, 2021.

DADARIO, Natália et al. *Waste-to-energy recovery from municipal solid waste: global scenario and prospects of mass burning technology in Brazil*. *Sustainability*, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 5397, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/5397>. Acesso em: 4 out. 2025.

DALMO, F. C. et al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], 2019.

DE MELO, Gilberto Caldeira Bandeira. *Apresentação técnica*. Belo Horizonte, MG: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2013. Disponível em: http://www.abes-mg.org.br/arquivos/site/cursos_e_seminarios/apresentacao-gilberto-caldeira.pdf. Acesso em: 16 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Consumo de energia elétrica per capita* [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 5 jun. 2026.

FERREIRA, Elzimar Tadeu de F.; BALESTIERI, José Antonio P. *Comparative analysis of waste-to-energy alternatives for a low-capacity power plant in Brazil*. *Waste Management & Research*, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 247–258, 2018. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X17751849>. Acesso em: 4 out. 2024.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. *Localização*. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/bacias-pcj/localizacao/>. Acesso em: 24 maio 2026.

HOLANDA, Marcelo R.; BALESTIERI, José A. Perrella. *Optimisation of environmental gas cleaning routes for solid wastes cogeneration systems – Part I: Analysis of waste incineration steam cycle*. *Energy Conversion and Management*, Oxford, v. 49, n. 4, p. 791-803, 2008.

HOLANDA, Marcelo R.; BALESTIERI, José A. Perrella. *Optimisation of environmental gas cleaning routes for solid wastes cogeneration systems – Part II: Analysis of waste incineration combined gas/steam cycle*. *Energy Conversion and Management*, Oxford, v. 49, n. 4, p. 804-811, 2008.

KAUFMAN, Scott M.; THEMELIS, Nickolas J. *Using a direct method to characterize and measure flows of municipal solid waste in the United States*. Journal of the Air & Waste Management Association, [s. l.], v. 59, n. 12, p. 1386–1390, 2009. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3155/1047-3289.59.12.1386>. Acesso em: 25 set. 2024.

LEME, Marcio Montagnana Vicente. *Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia através dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso*. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

PADILHA, Jessé Luís; MESQUITA, André Luiz Amarante. *Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil*. Energy Conversion and Management, [s. l.], v. 265, p. 115743, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890422005398>. Acesso em: 4 out. 2024.

SÃO PAULO (Município). *Termo aditivo modificativo nº 08-2024 ao Termo de Contrato de Concessão nº 026/SSO/2004*. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/PsIt>. Acesso em: 15 jun. 2026.

SÃO PAULO (Estado). *Plano Paulista de Energia 2020*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2012.

SARNO, Gian Di. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE (São Paulo). Resolução SMA nº 79, de 4 de novembro de 2009. *Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos*. São Paulo, 2009.

THANGARASU, Vinoth et al. *Combustion characteristics and gasification kinetics of Brazilian municipal solid waste subjected to different atmospheres by thermogravimetric analysis*. Bioresource Technology, [s. l.], v. 403, p. 130906, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852424006096>. Acesso em: 15 out. 2024.

TISI, Yuri Schmitke Almeida Belchior; MATOS, Flávio Arantes; CARNEIRO, Maria Luisa Nerys de Moraes. *Guia nacional de valorização energética de resíduos sólidos no contexto da gestão integrada e sustentável*. Brasília, DF: ABREN, 2024.

**APÊNDICE – RELAÇÃO DE MUNICÍPIOS DA BACIA PCJ E SUA DISTRIBUIÇÃO
NAS URS**

ID	Municípios PCJ	UF	População (hab)	DF (ton/ano)	Município de instalação
1	Campinas	SP	1.185.977	477.938,8	Campinas
2	Hortolândia	SP	247.331	67.022,8	Campinas
3	Valinhos	SP	131.277	36.134,1	Campinas
4	Morungaba	SP	14.081	3.918,0	Campinas
5	Piracicaba	SP	438.827	171.382,3	Piracicaba
6	Santa Bárbara D Oeste	SP	189.338	49.920,0	Piracicaba
7	Botucatu	SP	150.442	40.640,6	Piracicaba
8	Capivari	SP	51.318	14.280,6	Piracicaba
9	Tietê	SP	38.690	12.117,7	Piracicaba
10	Rio das Pedras	SP	32.267	6.376,0	Piracicaba
11	Rafard	SP	9.133	1.950,5	Piracicaba
12	Saltinho	SP	8.371	3.207,3	Piracicaba
13	Anhembi	SP	5.766	2.071,8	Piracicaba
14	Mombuca	SP	3.815	1.611,0	Piracicaba
15	Vinhedo	SP	79.235	39.250,0	Indaiatuba
16	Monte Mor	SP	67.296	26.142,9	Indaiatuba
17	Indaiatuba	SP	267.796	87.144,4	Indaiatuba
18	Itu	SP	174.561	58.788,9	Indaiatuba
19	Salto	SP	140.125	33.982,8	Indaiatuba
20	Itupeva	SP	74.119	23.040,4	Indaiatuba
21	Cabreúva	SP	48.473	14.196,0	Indaiatuba
22	Elias Fausto	SP	18.103	5.488,1	Indaiatuba
23	Jundiaí	SP	460.313	121.335,5	Jundiaí
24	Itatiba	SP	126.403	37.507,0	Jundiaí
25	Várzea Paulista	SP	119.576	60.177,0	Jundiaí
26	Campo Limpo Paulista	SP	79.663	49.038,0	Jundiaí
27	Louveira	SP	54.111	24.047,5	Jundiaí
28	Limeira	SP	300.728	72.819,7	Limeira
29	Americana	SP	246.655	78.600,8	Limeira
30	Rio Claro	SP	208.857	65.174,3	Limeira
31	São Pedro	SP	39.725	11.869,8	Limeira
32	Cordeirópolis	SP	25.130	6.305,4	Limeira
33	Dois córregos	SP	24.855	4.500,0	Limeira
34	Brotas	SP	24.423	7.200,0	Limeira
35	Santa Gertrudes	SP	24.107	9.661,7	Limeira
36	Iracemápolis	SP	22.435	6.000,0	Limeira
37	Itirapina	SP	16.433	5.225,5	Limeira
38	Charqueada	SP	15.798	3.359,0	Limeira

ID	Municípios PCJ	UF	População (hab)	DF (ton/ano)	Município de instalação
39	Torrinha	SP	9.484	2.040,0	Limeira
40	Ipeúna	SP	6.999	2.278,0	Limeira
41	Santa Maria da Serra	SP	5.314	1.483,0	Limeira
42	Analândia	SP	4.684	2.200,0	Limeira
43	Corumbataí	SP	4.285	612,0	Limeira
44	Águas de São Pedro	SP	2.829	1.036,0	Limeira
45	Artur Nogueira	SP	53.157	17.087,8	Limeira
46	Engenheiro Coelho	SP	20.139	5.469,3	Limeira
47	Sumaré	SP	289.787	64.009,0	Paulínia
48	Paulínia	SP	115.690	85.320,0	Paulínia
49	Mogi Mirim	SP	95.534	21.016,4	Paulínia
50	Nova Odessa	SP	64.228	34.125,8	Paulínia
51	Jaguariúna	SP	61.801	20.982,3	Paulínia
52	Cosmópolis	SP	61.204	25.384,1	Paulínia
53	Santo Antônio de Posse	SP	23.779	6.227,2	Paulínia
54	Holambra	SP	15.596	7.439,4	Paulínia
55	Amparo	SP	69.717	17.073,8	Paulínia
56	Pedreira	SP	44.332	8.928,0	Paulínia
57	Jarinu	SP	39.531	23.500,0	Bragança Paulista
58	Bragança Paulista	SP	184.634	70.300,0	Bragança Paulista
59	Atibaia	SP	166.043	53.351,6	Bragança Paulista
60	Mairiporã	SP	97.399	35.117,8	Bragança Paulista
61	Extrema	MG	57.913	18.213,0	Bragança Paulista
62	Socorro	SP	41.405	8.760,0	Bragança Paulista
63	Serra Negra	SP	30.920	8.212,0	Bragança Paulista
64	Camanducaia	MG	27.551	7.968,4	Bragança Paulista
65	Piracaia	SP	26.764	9.002,3	Bragança Paulista
66	Bom Jesus dos Perdões	SP	22.501	7.199,0	Bragança Paulista
67	Nazaré Paulista	SP	18.620	6.534,0	Bragança Paulista
68	Pinhalzinho	SP	15.605	3.008,6	Bragança Paulista
69	Itapeva	MG	13.332	22.011,8	Bragança Paulista
70	Joanópolis	SP	13.095	3.840,0	Bragança Paulista
71	Vargem	SP	10.805	2.413,6	Bragança Paulista
72	Monte Alegre do Sul	SP	8.873	1.819,3	Bragança Paulista
73	Toledo	MG	7.541	3.007,0	Bragança Paulista
74	Tuiuti	SP	6.947	1.379,7	Bragança Paulista
75	Pedra Bela	SP	6.718	1.204,0	Bragança Paulista
76	Sapucai-Mirim	MG	6.462	1.131,5	Bragança Paulista