



Análise da eficiência termodinâmica de cidades e potencial de inovação na produção e utilização de biogás no Oeste do Paraná

Thermodynamic efficiency analysis of cities and innovation potential in biogas production and utilization in Western Paraná

Ricardo Morel Hartmann¹

<https://orcid.org/0000-0002-6232-6503>

Luan Carlos Covalski Cozer²

<https://orcid.org/0009-0001-0463-8306>

Luis Evelio Garcia Acevedo³

<https://orcid.org/0000-0001-5630-0158>

Resumo: O objetivo deste trabalho é realizar uma análise termodinâmica de cenários de algumas cidades do Oeste do Paraná, a fim de avaliar o quão eficiente as cidades são em seu consumo de energia, e em seguida avaliar o potencial de influência da recuperação energética do biogás na eficiência exergética da cidade. Para isso utilizado o método de Análise Termodinâmica de Cidades nos municípios de Marechal Cândido Rondon, Cascavel, Foz do Iguaçu, Toledo, Guaíra, Medianeira e Matelândia, também foi aplicado o modelo Scholl-Canyon que estima a quantidade de metano gerado por ano em um dado aterro sanitário, que tem por ideia capturar o biogás e realizar a sua combustão em um motogerador para geração de eletricidade. Em seguida analisou-se o cenário 2 considerando o potencial da recuperação energética do biogás tem na eficiência exergética final do município. Os resultados se mostraram promissores nos âmbitos ambientais, sociais e econômicos, ultrapassando o potencial de R\$12 milhões de reais recuperados no ano 2021 em Cascavel, podendo ter o incremento de até de 2,03% na eficiência da cidade de Foz do Iguaçu, entre outros pontos positivos.

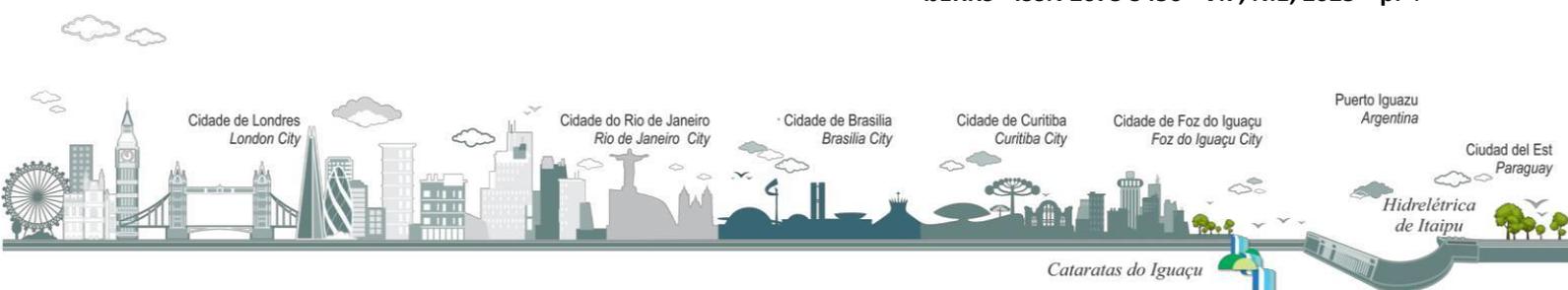
Palavras-Chave: Biogás de aterro sanitário; Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos; Eficiência Exergética; Análise termodinâmica de cidades.

Abstract: The objective of this work is to conduct a thermodynamic analysis of some cities in western Paraná to evaluate how efficient these cities are in their energy consumption, and subsequently, to assess the potential influence of biogas energy recovery on the exergy efficiency of the cities. For this purpose, the Thermodynamic Analysis of Cities method was applied to the municipalities of Marechal Cândido Rondon, Cascavel, Foz do Iguaçu, Toledo, Guaíra, Medianeira, and Matelândia. Additionally, the Scholl-Canyon model, which estimates the amount of methane generated annually in a landfill, was used to capture biogas and combust it in a generator for electricity production. The potential influence of this biogas energy recovery on the final exergy efficiency of the municipalities was then analyzed. The results were promising in environmental, social, and economic aspects, surpassing the potential

¹ Docente do curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, campus Parque Tecnológico de Itaipu – PTI. E-mail: ricardo.hartmann@unila.edu.br

² Graduando em Engenharia de Energia, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, campus Parque Tecnológico de Itaipu – PTI. E-mail: lcc.cozer.2020@aluno.unila.edu.br

³ Docente do curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, campus Parque Tecnológico de Itaipu – PTI. E-mail: luis.acevedo@unila.edu.br





recovery of over R\$12 million in the year 2021 in Cascavel, with an increase of up to 2.03% in the efficiency of the city of Foz do Iguaçu, among other positive points.

Key Words: Landfill Biogas; Urban Solid Waste Management; Exergy Efficiency; Thermodynamic Analysis of Cities.

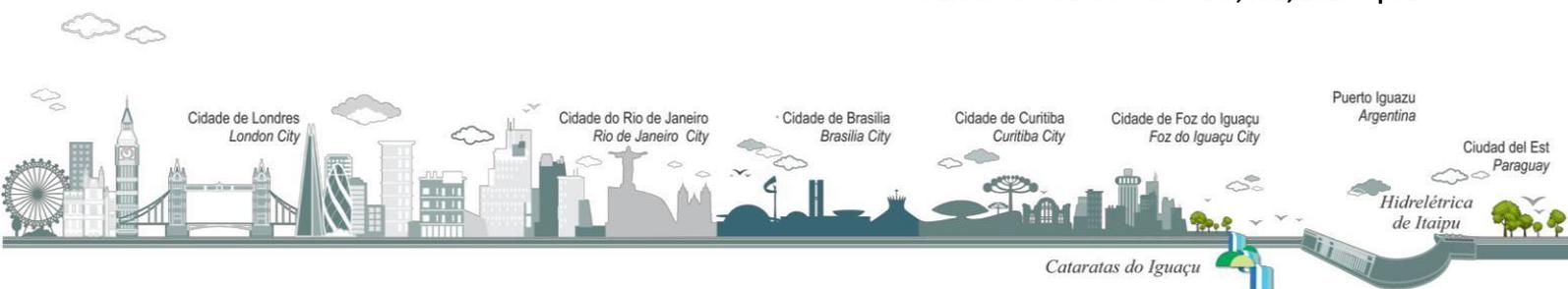
INTRODUÇÃO

O crescimento populacional no Brasil, que ultrapassou 213,3 milhões de habitantes em 2021 (IBGE, 2021), resultou em um aumento significativo na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), atingindo 82,5 milhões de toneladas anuais em 2021 (Abrelpe, 2021). Esses resíduos, quando não tratados adequadamente, liberam metano, um gás com potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o CO₂ (IPCC, 2015). Devido ao alto impacto ambiental dos RSU, incluindo poluição do solo, da água e do ar (Marques, 2011), é crucial buscar alternativas para sua destinação correta, como os aterros sanitários.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12305/2010, visa solucionar o problema do tratamento inadequado dos resíduos no Brasil, promovendo a substituição de lixões por aterros sanitários, que são considerados a melhor opção para a disposição de rejeitos. Esses aterros permitem controlar a degradação dos resíduos, reduzir emissões descontroladas e gerar subprodutos com valor agregado. Para isso, é fundamental a conscientização da população sobre a correta separação do lixo, garantindo um tratamento adequado para cada tipo de resíduo.

Um desses subprodutos é o biogás, uma mistura composta por diversos gases oriundos da decomposição da matéria orgânica que ocorre a partir do metabolismo de microrganismos anaeróbios. Os dois principais constituintes do biogás são o metano (CH₄) (40~75%) e o CO₂ (25~40%), sendo que o metano é um gás com elevado poder calorífico inferior (PCI), cerca de 35.558 kJ/m³ (Castañon, 2002). A concentração de metano no biogás determinará o seu PCI, situando entre 13 e 50 MJ/kg, em função do % de metano.

A geração de metano no aterro sanitário pode ser estimada por diversos modelos, mas nesse trabalho optou-se pela utilização do modelo conhecido por Scholl-Canyon, que é recomendado pelo Banco Mundial e tem se mostrado mais conservador e mais viável para os interesses desse tipo de trabalho do que outros modelos como aponta Freire (2018). De





maneira simplificada, a geração do biogás e sua estimativa dependem de diversos parâmetros, como o tipo de resíduo, temperatura, umidade, pH do meio, presença de oxigênio, de metais e ácidos, entre outros. Estes parâmetros alteram a biodegradabilidade do material afetando as constantes que estimam o potencial de geração do biogás do modelo utilizado.

O biogás representa uma importante possibilidade de recuperação energética dos RSU, uma vez que pode ser empregado na geração de energia térmica, mecânica e elétrica. O aproveitamento do biogás de aterro também é de interesse do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), um instrumento que faz parte do acordo intergovernamental conhecido como Protocolo de Quioto (2005) e que possibilita a geração e o comércio de créditos de carbono, aumentando a viabilidade do projeto.

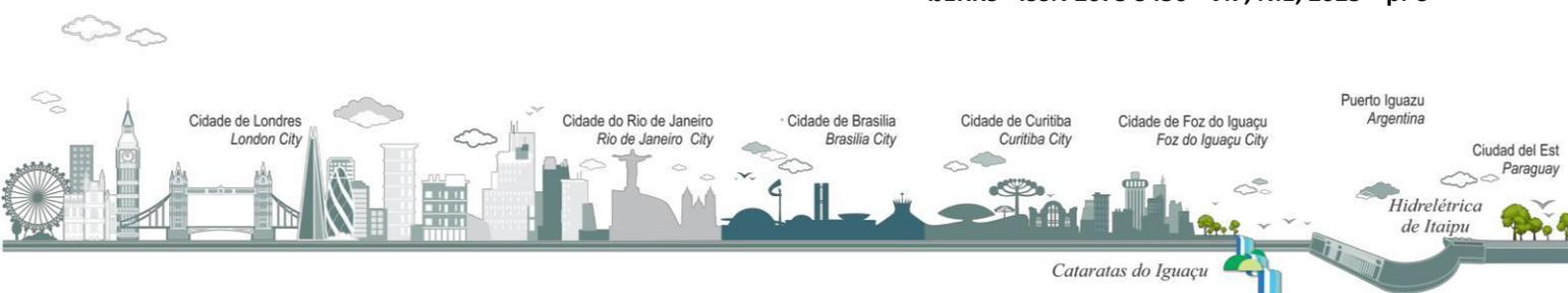
Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2023) o consumo energético Mundial foi de $618 \times 10^6 Tj$ (TeraJoules), enquanto o consumo energético brasileiro, de acordo com o *Balço Energético Nacional* (BEN, 2023) foi de $303 \times 10^6 tep$ – toneladas equivalentes de petróleo – o que equivale a aproximadamente $12,7 \times 10^6 Tj$, correspondendo a quase 2,05% do consumo total. Esse alto valor demandado e a necessidade da transição da matriz energética mundial por fontes ambientalmente sustentáveis, torna a recuperação energética do biogás oriundo de aterro sanitário um importante aliado.

Este trabalho visa então realizar uma análise termodinâmica de algumas cidades do Oeste do Paraná, a fim de avaliar o quão eficiente as cidades são em seu consumo de energia, e em seguida avaliar o potencial de influência da recuperação energética do biogás na eficiência energética da cidade. Quanto mais eficiente, mais ambientalmente sustentável será a cidade.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Análise termodinâmica de cidades

Segundo Hartmann e Dias (2021), o método de Análise Termodinâmica de Cidades aplica a análise termodinâmica de máquinas às cidades para obter parâmetros de desempenho comparáveis, utilizando a propriedade exergia. A propriedade exergia combina entalpia, entropia e temperatura em escala absoluta para medir a energia disponível para





realização de trabalho, onde a entropia representando as irreversibilidades do sistema. Para calcular a eficiência exergética de uma cidade, utiliza-se a equação 1, que ajusta o cálculo original para considerar diversos processos internos à cidade e fluxos de entrada de exergia, onde Ψ é a propriedade exergia.

$$\eta_{II} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \psi_{Destruida,i}}{\sum_{i=1}^n \psi_{Entrada,i}} \right) \quad (1)$$

Estimativa de Geração de Metano pelo modelo Scholl-Canyon

Para estimar a quantidade de metano gerado pela biodegradação dos resíduos sólidos urbanos destinados aos aterros sanitários, foi utilizado o modelo de Scholl-Canyon, o que segundo Elk (2007) trata-se de um modelo de primeira ordem criado pelo Banco Mundial, sendo simples e de fácil aplicação, utilizado pelas instituições financeiras relacionadas a projetos de aproveitamento de biogás em aterros sanitários nas Américas. O modelo considera que há uma fração constante de material biodegradável disponível no aterro, por unidade de tempo. A equação 2 abaixo mostra o cálculo da quantidade de metano gerado em um ano específico no aterro sanitário, variando de acordo com a quantidade mássica de deposição de resíduos, o tempo após o encerramento do aterro e duas constantes obtidas de acordo com a localidade.

$$Q_{CH_4,i} = k * L_0 * m_i * e^{-kt} \quad (2)$$

Onde o $Q_{CH_4,i}$ representa o volume de metano produzido no ano i (m^3 /ano), k é a constante de geração de metano (ano^{-1}), L_0 é o potencial de geração de metano (m^3 /ton), m_i é a massa de resíduos depositada no ano i (t/ano), o t é o tempo após o encerramento do aterro. De acordo com Freire (2018), a constante i representa a taxa de biodegradação após a disposição dos resíduos pelo qual o metano é gerado. A constante k é influenciada pela umidade, disponibilidade de nutrientes, pH e temperatura do meio, e é tabelada pela ESMAP, 2004 como é mostrado a seguir na Tabela 1.

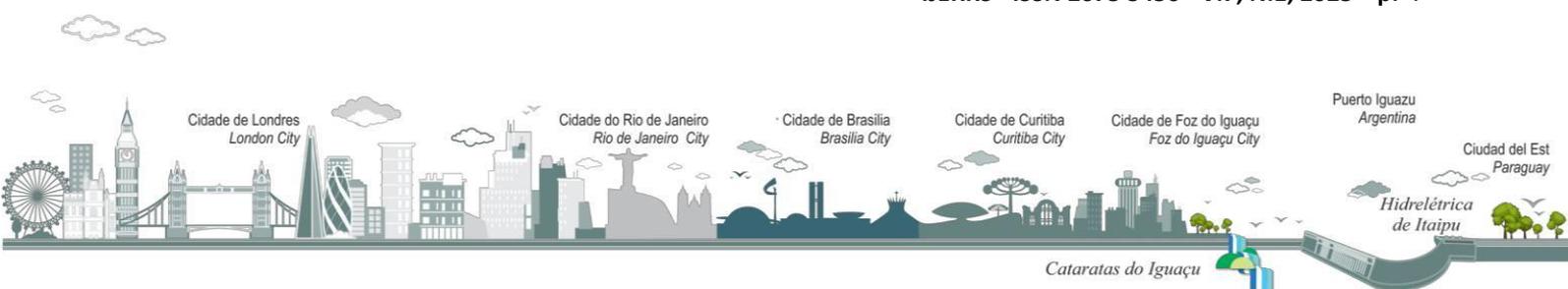




Tabela 1 – Valores sugeridos para k no modelo Scholl-Canyon.

Precipitação anual	Valores de k		
	Resíduo	Resíduo	Resíduo
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
250 a 500 mm	0,01	0,03	0,05
500 a 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Adaptado de ESMAP (2004)

Tabela 2 – Valores sugeridos para L_0 no modelo Scholl-Canyon

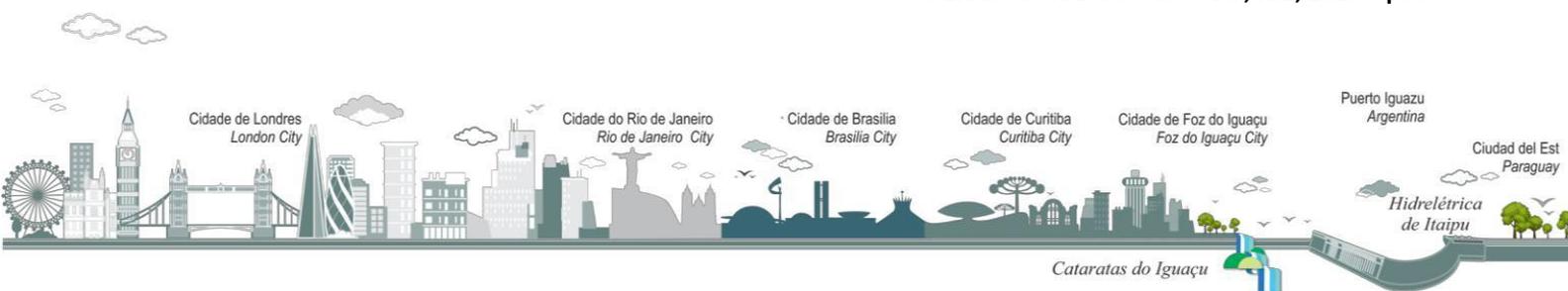
Categorização dos Resíduos	Valor mínimo de L_0 (m ³ /t)	Valor máximo de L_0 (m ³ /t)
Relativamente Inerte	5	25
Moderadamente Degradável	140	200
Altamente Degradável	225	300

Fonte: Adaptado de ESMAP (2004).

Embora k seja influenciado pelas variáveis descritas, ela é dada de acordo com a precipitação volumétrica no local estudado, pois a umidade é o seu principal parâmetro de referência, variando de 0,01 para locais secos e de baixa degradabilidade até 0,09 para locais úmidos e altamente degradáveis. Já o potencial de geração de metano L_0 , representa a carga total de metano a ser gerada no aterro, e o seu valor depende principalmente das frações que compõem os resíduos depositados, quanto mais orgânico for, maior será a degradabilidade. Podemos ver a tabela 2 a seguir, que define os intervalos para estimar a geração de metano.

METODOLOGIA

O trabalho iniciou com um levantamento bibliográfico sobre análise termodinâmica de cidades e metodologias de aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos, focando no uso de biogás de aterro sanitário. Em seguida, analisou-se a aplicabilidade da metodologia através de contatos com municípios da região oeste do Paraná, definindo Marechal Cândido Rondon como cidade piloto. Em parceria com a Secretaria de Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Sustentável do município, foram coletados dados de entrada e saída de energia. Avaliou-se a disponibilidade de metano no biogás do aterro sanitário e, usando o método Scholl-Canyon, estimou-se a geração de metano. Por fim, aplicou-se a Análise Termodinâmica de Cidades para avaliar a influência da recuperação energética na eficiência exergética da cidade. Na equação 1, eficiência exergética foi definida na forma de somatórios





compostos de múltiplos processos internos às cidades, onde a variável i representa qualquer processo de consumo e/ou transformação energética de interesse da cidade sob estudo. Para este trabalho, utilizaram-se os fluxos de entrada de energia dos principais combustíveis e de eletricidade. A eletricidade foi dividida de acordo com o consumo por classes, pois como veremos a frente as irreversibilidades geradas nos processos de consumo são distintas.

Os dados de consumo de combustíveis foram extraídos do site da ANP (Agência Nacional de Petróleo) para os combustíveis e convertidos até a obtenção do seu valor energético em TeraJoule [TJ] por meio da densidade [kg/m^3] e PCI (Poder Calorífico Inferior) [MJ/kg], quando necessário. Os valores de consumo para eletricidade foram obtidos nos cadernos estatísticos dos municípios, que podem ser facilmente encontrados na página do Ipardes, na seção dos cadernos municipais⁴.

Após a obtenção dos valores das entradas de energia em TJ dos combustíveis na ANP, utiliza-se o fator de correção de exergia química $Beta$, conforme definido por Szargut (1988) para a obtenção da exergia de entrada e posterior avaliação da equação 1.

Em seguida, obtêm-se da literatura a eficiência exergética para cada processo e então calcula-se a exergia destruída, e por último a eficiência exergética de toda a cidade utilizando a razão entre a soma de toda exergia destruída pela soma de toda exergia de entrada. O fator beta e a eficiência exergética também foram os mesmos recomendados por Hartmann e Dias (2021) e estão mostrados na Tabela 3.

⁴ <https://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/Cadernos-municipais>

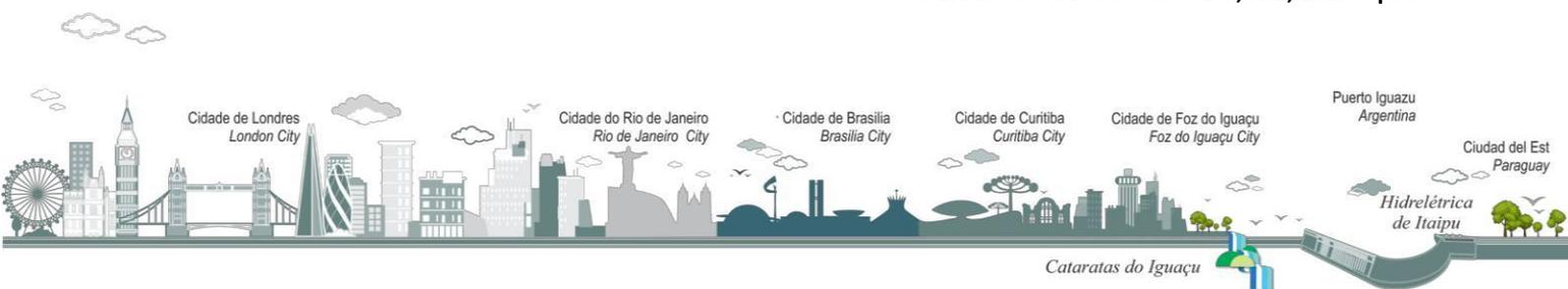




Tabela 3 – Fator Beta e eficiência exergética das entradas de energia na cidade.

Combustível		
Tipo	Fator Beta	Eficiência Exergética*1
Etanol Hidratado	1,08	25%
Gasolina C	1,07	25%
Óleo Diesel	1,06	25%
GLP	1,05	14,9%
QAV	1,06	25%
Eletricidade		
Classe	Fator Beta	Eficiência Exergética
Residencial		11,5%
Industrial		76%
Comércio, serviço e outros		11,5%
Rural	1,0*2	11,5%
Poder público		11,5%
Iluminação pública		20%
Serviço público		11,5%
Consumo próprio		11,5%

Fonte: Adaptado de Hartmann e Dias (2021).

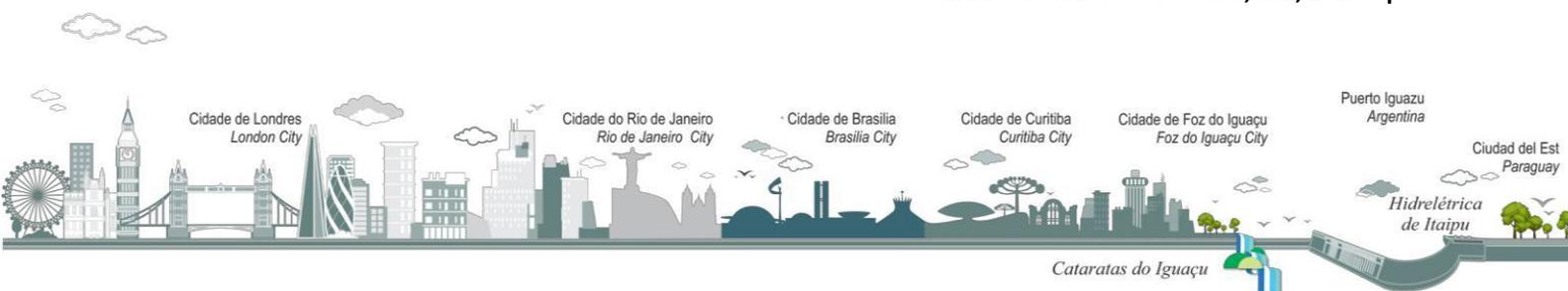
*1 Eficiência exergética de combustão em motores

*2 O fator beta para eletricidade é 1, pois a taxa de exergia é igual à potência elétrica.

Já para o modelo de Scholl-Canyon adotou-se as constantes de $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{ton}$ e $k = 0,06 \text{ ano}^{-1}$ devido categorização de resíduos em moderadamente degradáveis e alta pluviometria, no qual segundo o site *WeatherSpark* (que utiliza como base de dados estações meteorológicas em aeroporto e banco de dados de superfície integrado da NOAA) Marechal Cândido Rondon atinge 1524,6 mm de média no ano, ultrapassando então os 1000 mm anualmente. Os mesmos valores foram utilizados para as demais cidades avaliadas devido à proximidade e por possuírem o mesmo clima.

Após a coleta dos dados e aplicação do método para o município de MCR, expandiu-se para os demais municípios de Foz do Iguaçu, Cascavel, Toledo, devido a relevância desses municípios no oeste Paranaense, e Medianeira e Matelândia devido a localização intermediária dos municípios (entre Foz e Cascavel), e Guaíra por se situar na extremidade norte da região. Ressalta-se que não foi considerada a geração de eletricidade de nenhuma forma nas cidades estudadas, ou seja, apenas foram avaliados os consumos pelo método da análise termodinâmica de cidades.

Para o cálculo da eficiência exergética para o cenário hipotético 2 foi necessário a repetição da metodologia anterior referente a utilização de combustíveis, mas aplicando agora o modelo Scholl-Canyon para estimar a quantidade gerada de metano em m^3 , e utilizando o PCI





do metano em $35,5 \text{ MJ/m}^3$ (Lora; Venturini, 2012). Dessa forma obtemos a quantidade em MJ, e após a conversão para TJ. Com a energia de entrada, ou seja, a energia disponível devido à existência do metano gerado, considerou-se um fator de captação recomendado pela ESMAP (2004) de 75%, e, por fim, temos a recuperação energética do metano realizando a sua queima hipotética em um motogerador com 32% de eficiência, sendo estes dados de captação e eficiência do motogerador os mesmos utilizados por Freire (2018). De posse do valor energético potencial que pode ser obtido utilizando biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica, pôde-se construir um cenário hipotético onde toda esta energia seria transformada em energia elétrica e fornecida para a rede da concessionária de eletricidade na cidade sob análise. Neste cenário hipotético, a utilização do biogás produzido com os RSU teria o poder de aumentar a eficiência exergética da cidade. Isto porque a utilização do biogás produzido com resíduos sólidos urbanos economizaria a geração de eletricidade com outras fontes, melhorando então a eficiência da cidade. Para comparação do cenário hipotético com o estado atual da cidade sob análise utiliza-se a equação 3 abaixo para o cálculo da eficiência exergética com recuperação do biogás para produção de eletricidade.

$$\eta_{II} = 1 - \left(\frac{\psi_{Destruida} - \psi_{Recuperada}}{\psi_{Entrada}} \right) \quad (3)$$

RESULTADOS

Marechal Cândido Rondon, localizada na região oeste do Paraná, foi o principal foco deste estudo devido à parceria com a prefeitura e à possibilidade de realizar a utilização do biogás gerado no aterro sanitário local. A Tabela 4 a seguir apresenta os dados coletados para o município de Marechal Cândido Rondon, sendo dividida entre os dados coletados da ANP (combustíveis) e dos cadernos estatísticos (eletricidade).

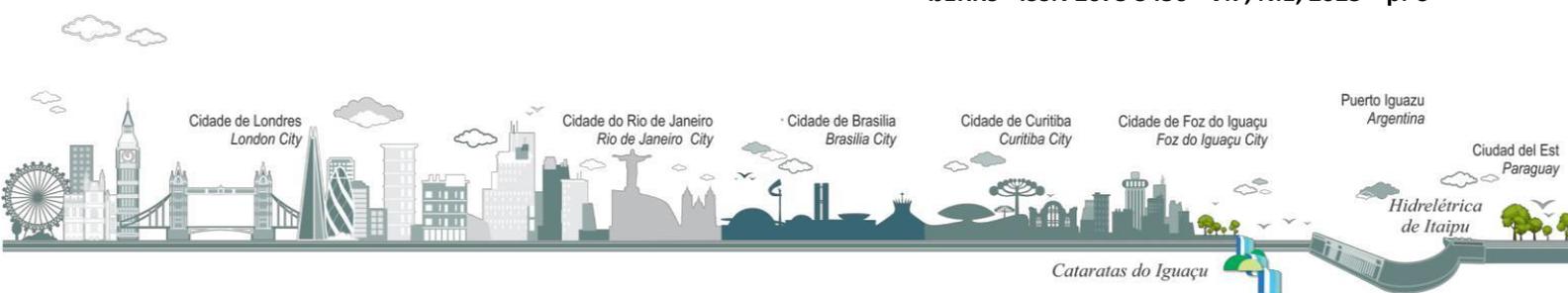




Tabela 4 – Coleta dos dados para o município de Marechal Cândido Rondon.

Combustíveis	
Tipo	Quantidade
Etanol Hidratado [L]	6.432.872
Gasolina C [L]	14.811.600
GLP [kg]	1.249.894
Óleo Diesel [L]	23.628.710
Querosene de aviação [L]	499
Eletricidade	
Classe	Consumo [MWh]
Residencial	48183,335
Industrial	118137,196
Comercial, Serviços e outras Atividades	31350,686
Rural	57417,321
Poder público	4513,523
Iluminação pública	8416,458
Serviço Público	4818,277
Consumo Próprio	229,959

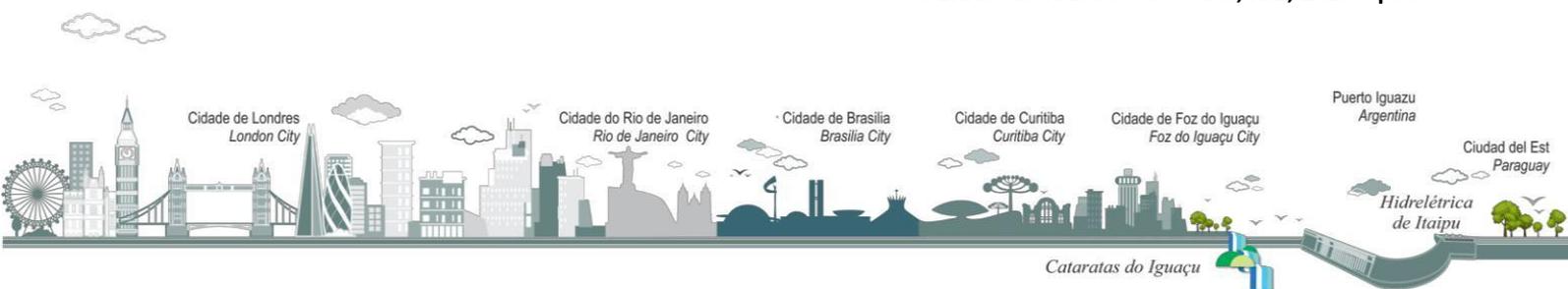
Fonte: Adaptado de ANP (2021) e IPARDES (2021).

Prosseguindo com o método, chega-se aos resultados mostrados da tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Resultados da análise termodinâmica de Marechal C. Rondon.

	Entrada de Exergia [TJ]	Eficiência Exergética	Saída de Exergia [TJ]	Exergia Destruída [TJ]
Energia Elétrica				
Residencial	173,460	11,50%	19,948	153,512
Industrial	425,294	76,00%	323,223	102,071
Comercial, Serviços	112,862	11,50%	12,979	99,883
Rural	206,702	11,50%	23,771	182,932
Poder público	16,249	11,50%	1,869	14,380
Iluminação pública	30,299	20,00%	6,060	24,239
Serviço Público	17,346	11,50%	1,995	15,351
Consumo Próprio	0,828	11,50%	0,095	0,733
Combustíveis				
Querosene de Aviação	0,018	25,00%	0,005	0,014
GLP	60,892	14,90%	9,073	51,819
Etanol Hidratado	144,718	25,00%	36,179	108,538
Gasolina C	469,715	25,00%	117,429	352,286
Óleo Diesel	888,225	25,00%	222,056	666,168
TOTAL	2546,608	30,42%	774,681	1771,926

Fonte: Autor, 2024





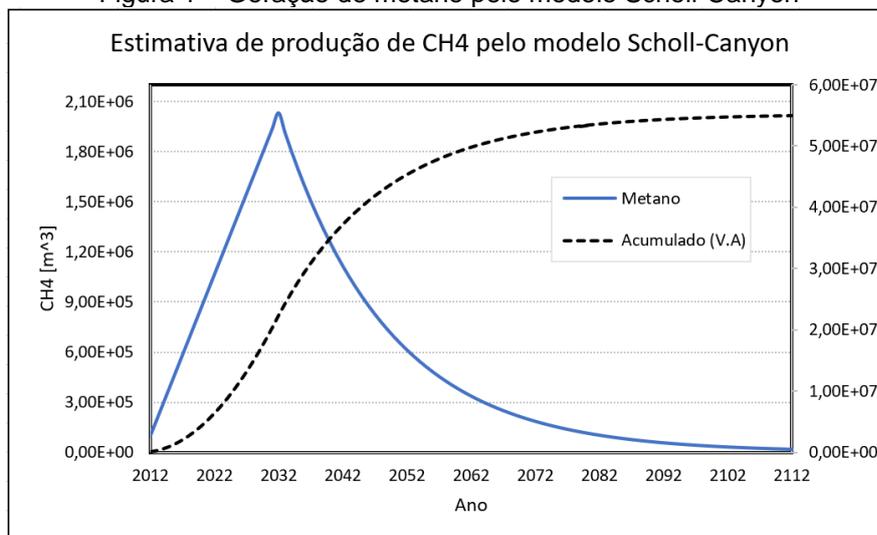
A eficiência exergetica aplicando a equação 1 para o município de MCR foi de 30,42%. Os dados do tempo de funcionamento do aterro e média de deposição de RSU foram obtidos visitando o aterro municipal e com a Secretaria de Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Sustentável de MCR, sendo o início do aterro no ano de 2012 e previsão de funcionamento até 2032, com deposição diária de 26 toneladas de resíduos. Dessa forma estimou-se a curva de geração de metano no intervalo de 100 anos, o mesmo utilizado por Freire (2017), com geração pontual de 954.720 m³ de CH₄ em 2021, como se pode verificar na Figura 1 e na Tabela 6.

Tabela 6 – Exergia recuperada e eficiência exergetica

	Geração 2021	PCI [MJ/m ³]	Energia [MJ]	Energia [TJ/ano]	Captação	Exergia Recup. [TJ]
CH ₄ (m ³)	954720	35,5	33892560	33,89256	75,00%	8,1342144
η_{II} (considerando a recuperação do metano, equação 3)					30,74%	

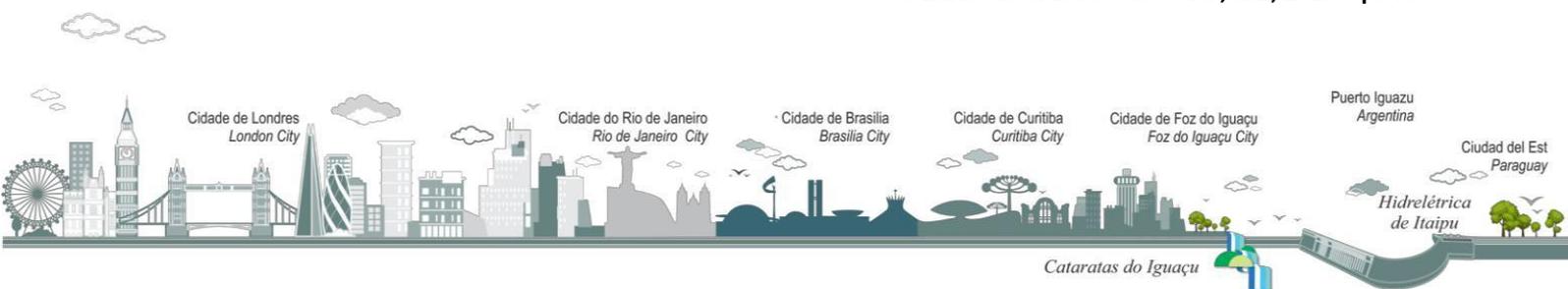
Fonte: Autor, 2024

Figura 1 – Geração de metano pelo modelo Scholl-Canyon



Fonte: Autor, 2024

A nova eficiência com a recuperação energética do metano foi de 30,74%, um acréscimo de 0,32%. Convertendo para KWh recuperados, são aproximadamente 2.259.505,81 KWh, e considerando a tarifa convencional para iluminação pública na classe e subclasse B4A R\$ 0,21306/KWh (COPEL, 2024) têm-se uma economia total no ano (para os

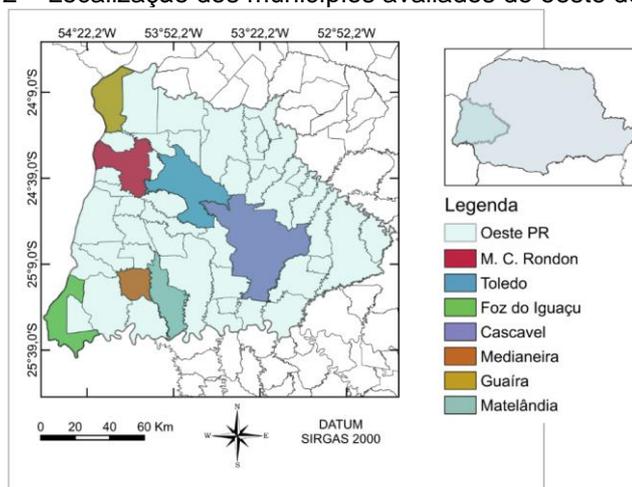




valores de 2021) de R\$ 481.410,31. Como se pode observar na figura 2, nos anos seguintes a geração de metano é maior, o que implica uma recuperação energética ainda maior e uma consequente redução de custos no consumo de eletricidade.

O mesmo processo foi aplicado para as cidades Cascavel, Foz do Iguaçu, Toledo, Medianeira, Guaíra e Matelândia. Podemos ver suas localizações na figura 2 abaixo.

Figura 2 – Localização dos municípios avaliados do oeste do Paraná.



Fonte: Autor, 2024.

Nas Tabelas 7 e 8 abaixo estão resumidos os dados de interesse para este estudo, em colunas por municípios.

Tabela 7 – Dados coletados para Foz do Iguaçu, Cascavel e Toledo.

Produto	Foz do Iguaçu	Cascavel	Toledo
Etanol Hidratado [L]	34.155.431	38.576.978	17.374.269
Gasolina C [L]	68.366.846	114.549.060	38.805.446
GLP [kg]	11.538.817	19.603.117	10.454.384
Óleo Diesel [L]	57.469.564	179.886.082	115.399.977
QAV [L]	10.037.241	1.018.130	270.253
Classe	Consumo no Ano de Eletricidade [TJ]		
Residencial	1041,11	1008,41	440,15
Industrial	57,06	1003,82	1307,16
Comercial, Serviços	886,78	851,40	309,62
Rural	19,66	191,54	273,13
Poder público	96,94	94,54	39,13
Iluminação pública	88,86	92,99	71,30
Serviço Público	49,31	104,56	34,59
Consumo Próprio	1,35	3,70	0,70
Total	2241,06	3350,96	2475,78

Fonte: Adaptado de ANP (2021) e IPARDES (2023).

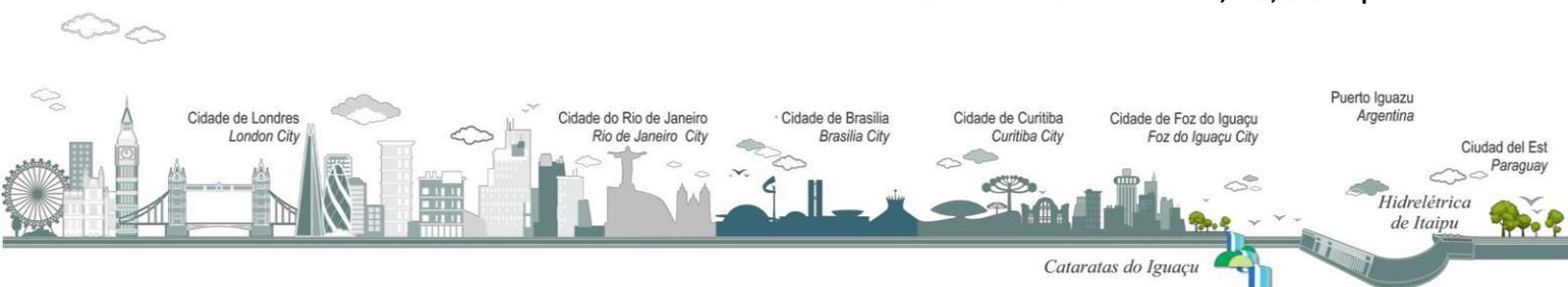




Tabela 8 – Dados coletados para Guaira, Medianeira e Matelândia.

Produto	Guaira	Medianeira	Matelândia
Etanol Hidratado [L]	5.629.688	4.681.922	1.691.064
Gasolina C [L]	11.198.000	4.203.000	4.203.000
GLP [kg]	269.513	6.771.686	108.463
Óleo Diesel [L]	68.864.700	15.315.000	11.408.000
QAV [L]	400	-	-
Classe	Consumo no Ano de Eletricidade [TJ]		
Residencial	100,66	174,88	44,61
Industrial	54,30	428,59	490,19
Comercial, Serviços	60,48	142,79	18,70
Rural	17,26	59,69	51,01
Poder público	16,77	11,38	4,19
Iluminação pública	16,64	14,99	6,38
Serviço Público	12,13	9,32	8,35
Consumo Próprio	0,69	0,46	0,17
Total	278,93	842,11	623,59

Fonte: Adaptado de ANP (2021) e IPARDES (2023).

A Tabela 9 abaixo traz a eficiência exergética de cada uma das cidades avaliadas sem considerar nenhuma geração interna de energia, aplicando a equação 1.

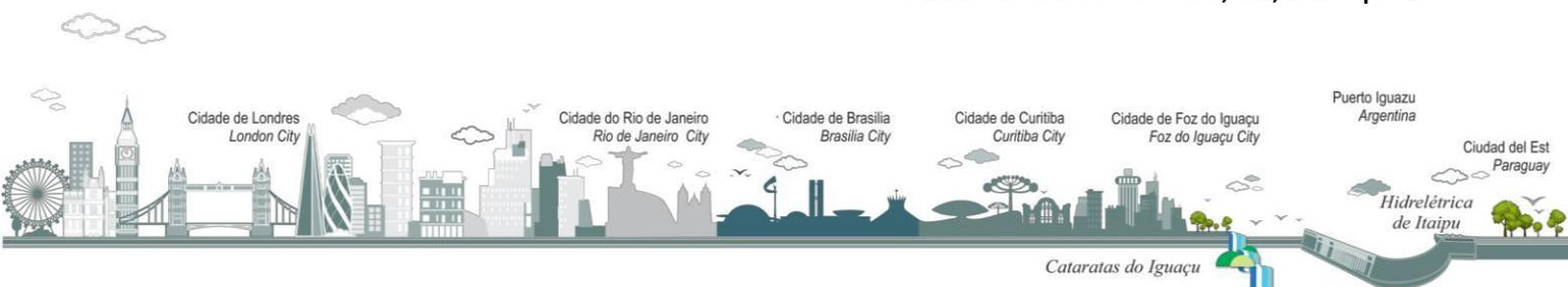
Tabela 7 – Eficiência exergética dos municípios sem uso de biogás, equação 1.

Município	Eficiência sem uso de biogás
Marechal Cândido Rondon	30,420%
Foz do Iguaçu	21,191%
Cascavel	25,683%
Toledo	30,176%
Guaira	24,924%
Medianeira	31,581%
Matelândia	43,876%

Fonte: Autor, 2024.

Nota-se que a maior eficiência ficou para o município de Matelândia com quase 43,9%. Podemos perceber também, que a menor eficiência (~21,2%) ficou para Foz do Iguaçu. Outra cidade com baixa eficiência exergética foi Guaira com aproximadamente 24,9%.

Para as estimativas de metano gerado nos respectivos aterros sanitários municipais no ano de 2021, foi utilizado o código desenvolvido pelo autor, que se baseia na mesma metodologia do modelo Scholl-Canyon. Uma dificuldade foi encontrar um valor fixo de massa





do RSU que é depositada periodicamente, e que represente bem o aterro. A seguir são descritos os valores utilizados para cada município.

- Cascavel: Foi coletado os valores da deposição de RSU anualmente disponíveis no SINIR – Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos –, que contém dados desde 2014 até 2019. A partir da média desses dados com outro coletado na página da câmara de cascavel que informava 320 ton/dia, chegou-se no valor de 265 toneladas/dia, sendo o início do funcionamento do aterro em 1996, ou seja, até o fim de 2021 totalizou-se 26 anos de atividade.

- Foz do Iguaçu: Também foi realizado a média de todos os dados coletados, sendo eles os de 2014 até 2019 (com exceção de 2015 que não há informação) fornecidos pelo SINIR, e com o dado de 320 ton/dia (Campos, 2023) chegou-se por fim em 255 toneladas/dia. O aterro está em atividade desde 2001, com 21 anos no total.

- Toledo: Os dados presentes no SINIR se mostraram regulares e semelhante ao fornecido pelo site do município informado pela secretaria do meio ambiente, e, portanto, foi utilizado o valor de 87 toneladas/dia. O tempo de atividade do aterro foi de 19 anos até 2021, tendo o início do funcionamento em dezembro de 2002, entretanto, foi considerado apenas em 2003.

- Medianeira: Devido a constância dos valores fornecidos pelo SINIR, adotou-se a deposição diária de 36 toneladas, e início do aterro em 2006, com 15 anos de funcionamento.

- Matelândia: Poucos dados disponíveis a respeito de Matelândia devido à ausência da entrega dos relatórios ao SINIR em vários anos, foi então realizado uma média dos que estavam disponíveis, e com o valor de 6 toneladas informadas pelo Plano Municipal de Saneamento Básico, resultando na média de 5 toneladas ao dia. O tempo de funcionamento até 2021 é de 14 anos, tendo início das atividades em 2008.

- Guaíra: Devido à consistência dos dados apresentados no SINIR, utilizou-se o valor de 50 toneladas ao dia de RSU, sendo 1998 o início das atividades do aterro, portanto, 24 anos até o fim de 2021.

A partir desses dados, foram calculadas as eficiências das cidades, comparando a aplicação das equações 1 e 3. Os resultados estão mostrados na tabela 8 e na Figura 3.

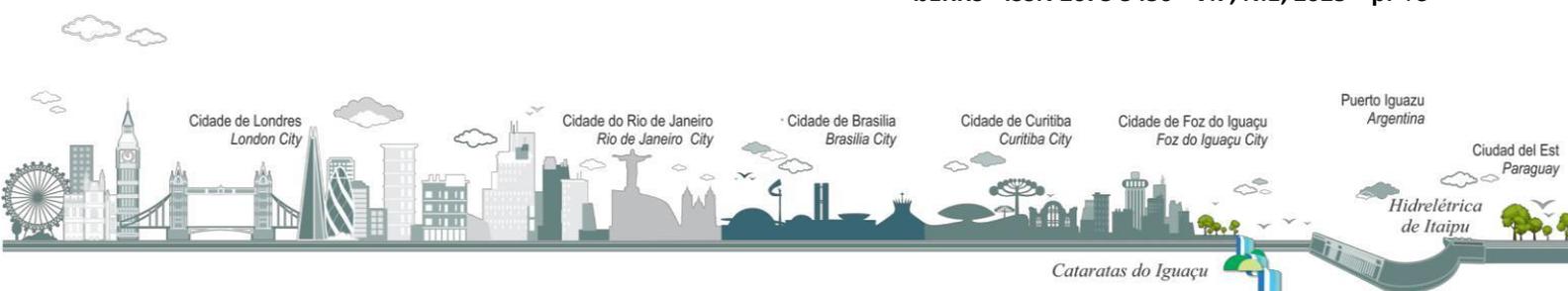


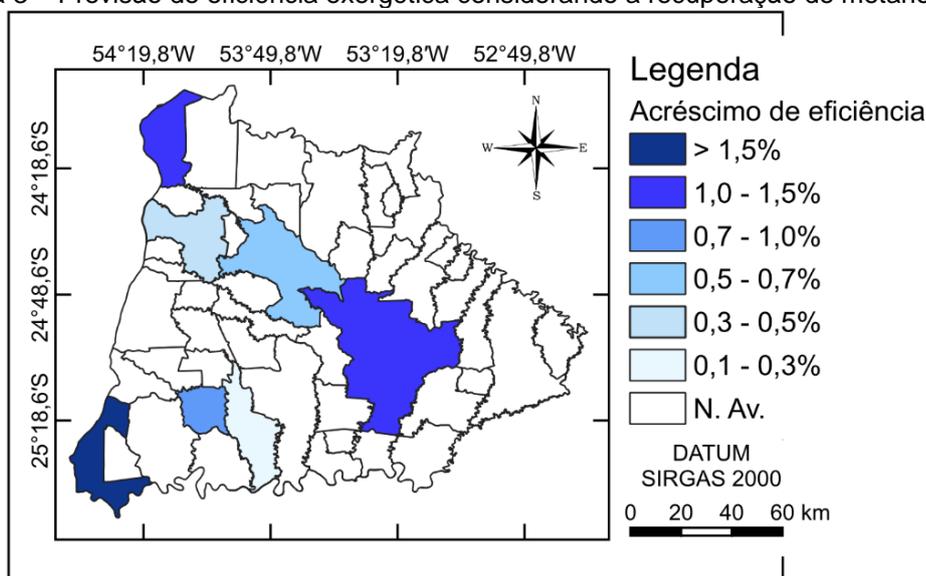


Tabela 8 – Eficiência dos municípios com recuperação do CH₄ recuperado.

Município	CH ₄ [m ³]	η_{II} sem uso de biogás (Eq. 1)	η_{II} com CH ₄ recup. (Eq. 3)	Diferença
M. C. Rondon	954.720	30,420%	30,740%	0,319%
Foz do Iguaçu	19.663.560	21,191%	23,217%	2,026%
Cascavel	25.300.080	25,683%	27,064%	1,381%
Toledo	6.069.816	30,176%	30,754%	0,578%
Guaíra	4.406.400	24,924%	26,041%	1,116%
Medianeira	2.115.072	31,581%	32,289%	0,709%
Matelândia	257.040	43,876%	44,054%	0,178%

Fonte: Autor, 2024.

Figura 3 – Previsão de eficiência exergética considerando a recuperação de metano (Eq. 3).



Fonte: Autor, 2024.

Observa-se que Foz do Iguaçu foi o município que teve a maior diferença na eficiência exergética após a recuperação energética pelo biogás, seguida por Cascavel ficou com o segundo maior aumento. Guaíra ficou com incremento acima dos 1% e Toledo teve aumento de 0,58%.

A tabela 9 e figura 4 a seguir mostram o potencial de recuperação energética do biogás em valores brutos de energia e valores monetários, seguindo os mesmos critérios utilizados anteriormente para Marechal Cândido Rondon.

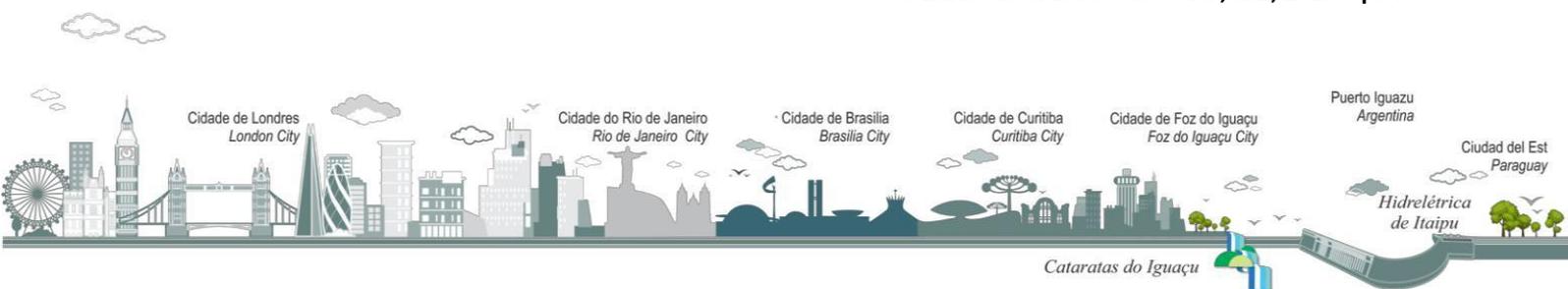


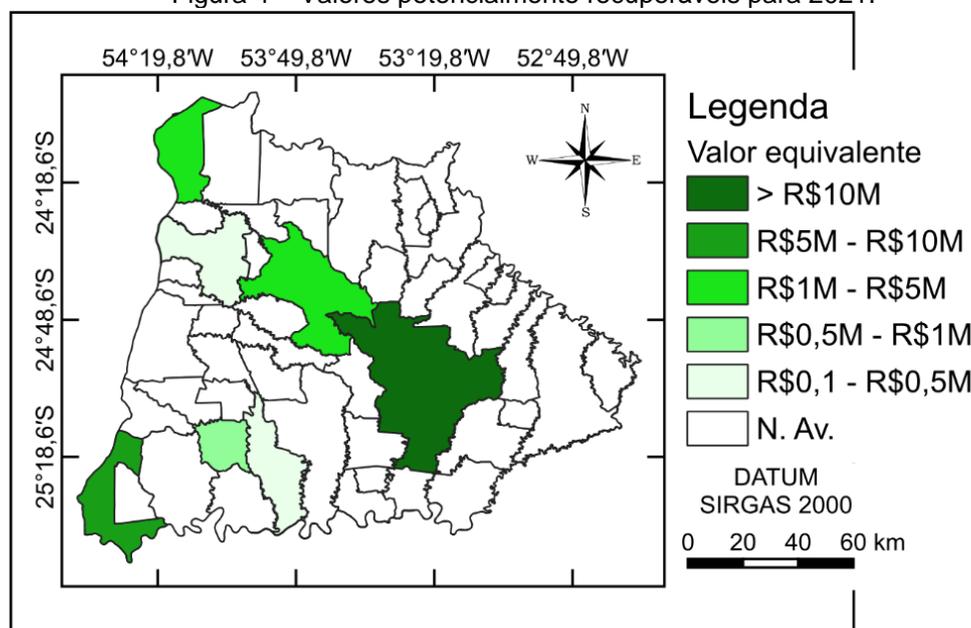


Tabela 9 – Valores potencialmente recuperáveis a partir do biogás de aterro, por ano.

Município	Energia potencialmente recuperada [TJ]	Energia potencialmente recuperada [kWh]	Valor potencialmente economizado
M. C. Rondon	8,134	2.259.505,81	R\$ 481.410,31
Foz do Iguaçu	167,534	46.537.129,23	R\$ 9.915.200,75
Cascavel	215,557	59.876.903,90	R\$ 12.757.373,15
Toledo	51,715	14.365.242,69	R\$ 3.060.658,61
Guaíra	37,543	10.428.488,34	R\$ 2.221.893,73
Medianeira	14,078	3.910.683,13	R\$ 833.210,15
Matelândia	2,190	608.328,49	R\$ 129.610,47

Fonte: Autor, 2024

Figura 4 – Valores potencialmente recuperáveis para 2021.



Fonte: Autor, 2024.

Os municípios que geram mais metano nos aterros sanitários tendem a ter maior retorno financeiro, e, mesmo aqueles com retorno inicial mais baixo, devem se tornar mais atrativos ao longo do tempo devido ao aumento contínuo da geração de metano. Guaíra se destaca com grande potencial de recuperação energética e financeira, quase igualando Toledo, apesar de sua população ser bem menor. Os principais resultados ambientais são apresentados na tabela 10.

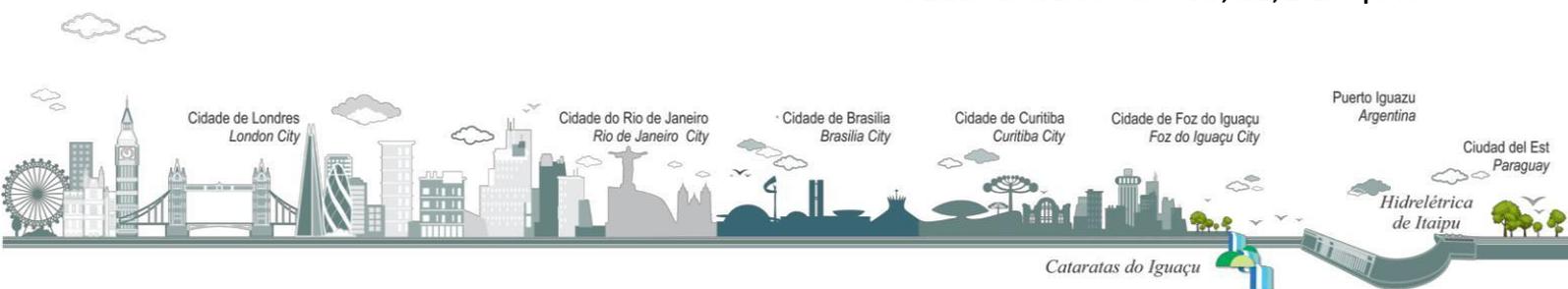




Tabela 10 – Principais resultados ambientais.

Município	RSU 2021	Incremento de η	Captura de CH ₄ da atm. em 2021 [m ³]
M. C. Rondon	9360	0,319%	716.040
Foz do Iguaçu	91800	2,026%	14.747.670
Cascavel	95400	1,381%	18.975.060
Toledo	31320	0,578%	4.552.362
Guaíra	18000	1,116%	3.304.800
Medianeira	12960	0,709%	1.586.304
Matelândia	1800	0,178%	192.780

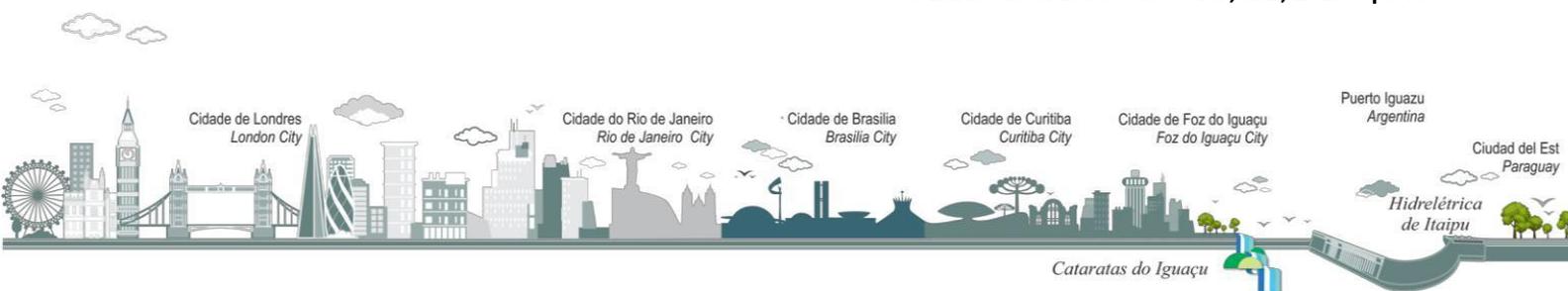
Fonte: Autor, 2024.

Quanto maior a deposição de resíduos no aterro sanitário, maior é a captura de metano, reduzindo a liberação desse gás poluente na atmosfera. Isso ressalta a importância de destinar corretamente os resíduos sólidos urbanos (RSU) para minimizar os danos ao meio ambiente.

ANÁLISES E DISCUSSÕES

A presente seção tem como objetivo discutir os principais resultados obtidos na análise exergética dos municípios estudados, destacando os fatores que influenciam diretamente nos diferentes níveis de eficiência observados entre eles. Serão analisadas as particularidades de cada localidade, com ênfase nos setores com maior impacto no desempenho exergético, como a mobilidade urbana, o uso da eletricidade e a atividade industrial. Além disso, serão comparados os cenários com e sem recuperação energética do biogás, a fim de compreender como a valorização energética dos resíduos sólidos urbanos pode contribuir para a melhoria da eficiência exergética nas cidades. A seguir, detalha-se o comportamento de cada município dentro do contexto avaliado.

É importante reforçar que a maior eficiência ficou para o município de Matelândia com quase 43,9%, sendo que Matelândia é uma das cidades com menor população dentre todas as analisadas. Isto ocorre devido a Matelândia ser uma pequena cidade e por isso há em seu interior deslocamentos curtos por automóveis, acarretando baixo consumo percentual com combustíveis. Além disso apresenta baixo consumo percentual com eletricidade, a exceção do setor industrial que teve um alto percentual. E isto é importante na análise termodinâmica



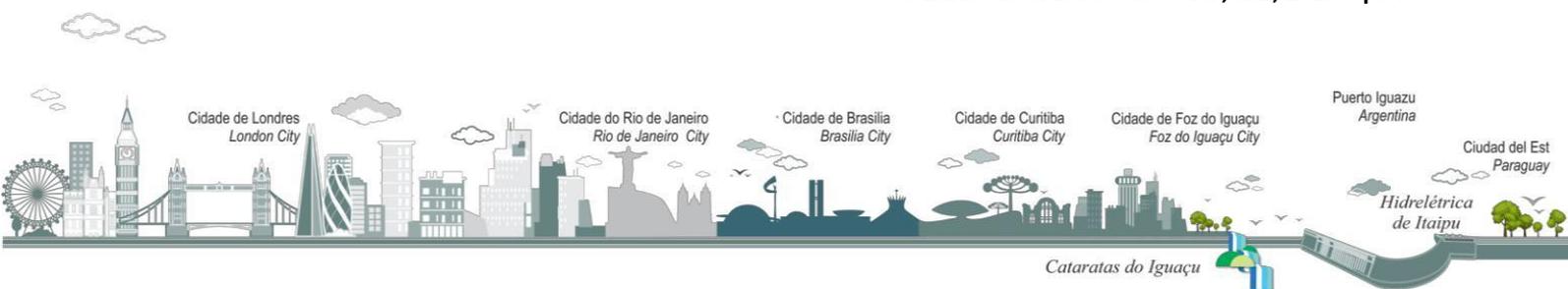


da cidade visto que a eficiência exergética do uso da eletricidade na indústria é maior do que nos outros setores, aumentando então o valor da eficiência exergética da cidade.

É importante perceber também que no outro extremo, com menor eficiência, ficou Foz do Iguaçu com 21,2 %. Isto ocorre justamente porque Foz do Iguaçu é o oposto de Matelândia: uma cidade relativamente grande, com alto consumo exergético na maioria dos setores, com exceção da indústria onde Foz do Iguaçu teve o menor percentual entre as cidades avaliadas. Além destas diferenças Foz do Iguaçu é uma cidade muito mais quente do que Matelândia o que resulta no uso muito maior de equipamentos de ar-condicionado. Conforme discutido por Hartmann e Dias (2021) e Hartmann e Garcia-Acevedo (2022) os equipamentos de ar-condicionado são os equipamentos com menor eficiência exergética, aproximadamente 2 %, o que resulta em que cidades que utilizam muito este tipo de equipamento apresentem baixa eficiência exergética. Outra cidade que teve um baixo valor de consumo percentual de eletricidade para o setor industrial, foi Guaíra, que ficou com a segunda menor eficiência exergética, com aproximadamente 24,9%. É importante lembrar que a exemplo de Foz do Iguaçu, Guaíra é uma cidade mais quente do que Matelândia, o que ajuda a explicar a diferença de eficiência exergética calculada para as duas cidades. Neste ponto específico, uma estratégia para melhorar a eficiência exergética de Foz do Iguaçu e Guaíra seria investir na melhoria da eficiência energética das edificações para diminuir o a utilização de equipamentos de ar-condicionado, aplicando por exemplo estratégias de arquitetura bioclimática. A aplicação da norma brasileira do PBE edifica⁵ poderia ser útil neste contexto. Outra recomendação nesse mesmo sentido são as estratégias para combate das ilhas de calor nas cidades, o que envolve medidas de urbanismo e construção, como aumentar áreas verdes, telhados verdes e uso de materiais que refletem o calor, além de medidas de gestão urbana como redução de poluição e incentivo à mobilidade sustentável.

Com relação a mobilidade urbana nas cidades analisadas, é importante lembrar que eficiência exergética dos processos envolvendo a queima da maioria dos combustíveis em motores a combustão é de 25 %. Os combustíveis gasolina, óleo Diesel e etanol representam as maiores frações na maioria das cidades e isso faz com que as eficiências exergéticas relacionados a processos de mobilidade urbana fiquem em torno deste valor. Podemos ver

⁵ (<https://pbeedifica.com.br/>)





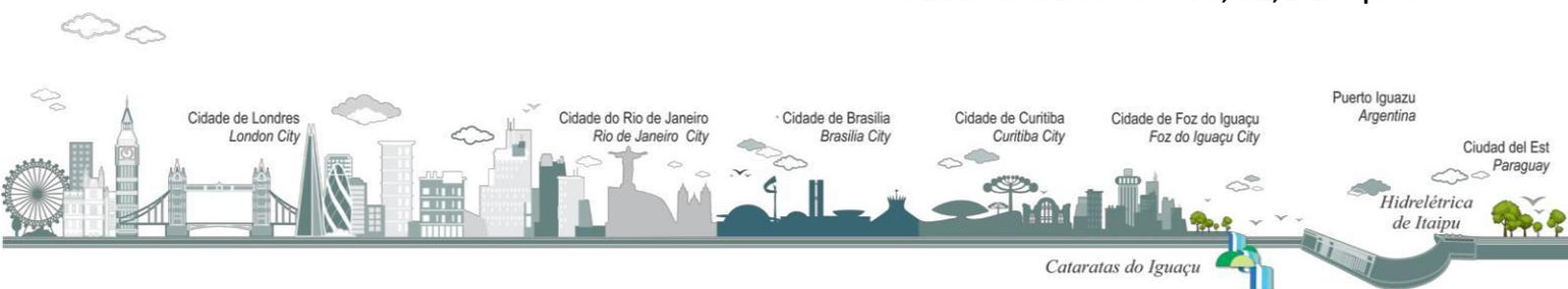
um exemplo claro disso que foi o município de Cascavel com eficiência de apenas 25,7%, devido ao alto consumo de combustíveis. Os demais municípios ficaram entre 30 e 32%, com alta demanda no setor industrial, o que puxou a eficiência para cima, mas também bastante consumo nos demais itens. Embora a cidade de Cascavel apresente consumo energético parecido em todos os itens, o setor industrial não foi suficientemente alto para ultrapassar muito o valor de 25%, tendo passado apenas 0,7%. Dessa forma, nota-se que a análise de eficiência exergética da cidade permite avaliar o quanto uma cidade é desenvolvida para indústria proporcionalmente aos demais municípios.

Com relação a comparação do cenário 2 com recuperação energética do biogás, observa-se que Foz do Iguaçu foi o município que teve a maior diferença na eficiência exergética após a recuperação energética pelo biogás (Figura 3). O motivo disto é devido à grande deposição de resíduos orgânicos no aterro sanitário, que gera muito metano e conseqüentemente um grande valor de energia, que proporcionalmente ao consumo da cidade é maior que o de outros municípios. Cascavel ficou com o segundo maior aumento, pois é a cidade com maior quantidade de RSU depositados no aterro por ano. Entretanto, apresenta também a maior demanda energética, o que faz com que na proporção, a energia do metano captado seja menor comparada a Foz do Iguaçu. Guáira ficou com incremento acima dos 1%, isso se deve ao fato de ter uma alta taxa de RSU no aterro, 50 ton/dia, e consumo mais baixo do que Toledo, que por sua vez teve aumento de 0,58%.

Esse incremento percentual da eficiência mostra a relação da geração de metano (que também indica a taxa de recebimento de RSU nos aterros) com o consumo dos itens analisados na metodologia de análise termodinâmica de cidades. O quociente entre a exergia gerada (pelo metano capturado e queimado no motorgerador) pela exergia de entrada total, é exatamente o incremento na eficiência final.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa ressaltam o potencial promissor do reaproveitamento energético do biogás de aterro sanitário como uma fonte sustentável e economicamente viável. Os resultados estão em base anual,

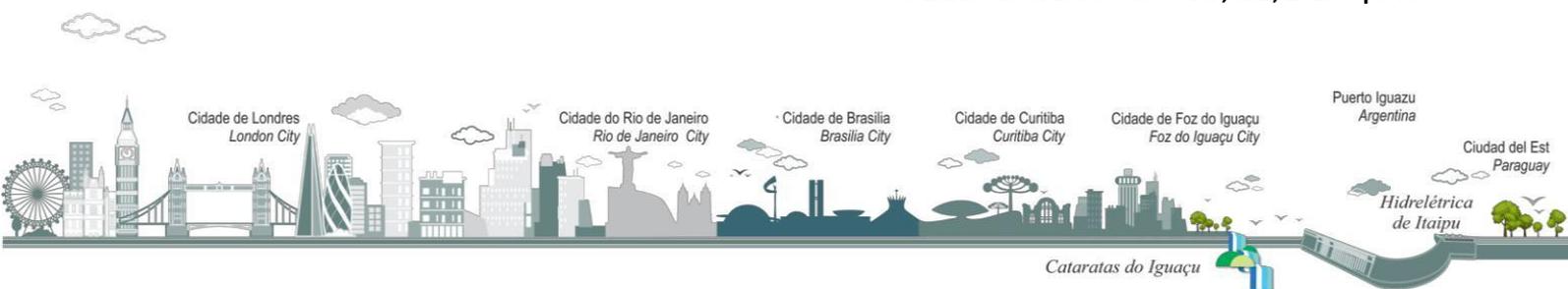




- Foz do Iguaçu: Aumento da eficiência em 2,06%, economia de aproximadamente R\$10 milhões, e captura de 14,7 milhões de m³ de metano;
- Cascavel: Aumento da eficiência em 1,38%, economia de cerca de R\$12,8 milhões, e captura de 19 milhões de m³ de metano;
- Toledo: Aumento da eficiência em 0,58%, economia de aproximadamente R\$3 milhões, e captura de 4,5 milhões de m³ de metano;
- Marechal Cândido Rondon: Aumento da eficiência em 0,32%, economia de cerca de R\$500 mil, e captura de 700 mil m³ de metano;
- Guaíra: Aumento da eficiência em 1,12%, economia de aproximadamente R\$2,2 milhões, e captura de 3,3 milhões de m³ de metano;
- Medianeira: Aumento da eficiência em 0,71%, economia de cerca de R\$833 mil, e captura de 1,6 milhão de m³ de metano;
- Matelândia: Aumento da eficiência em 0,18%, economia de aproximadamente R\$130 mil, e captura de 193 mil m³ de metano;

Os resultados mostraram a importância ambiental da correta gestão de resíduos sólidos urbanos bem como benefícios econômicos para as cidades, possibilitando a geração de energia renovável, reduzindo o consumo de eletricidade e permitindo o uso do metano como substituto do GLP em processos térmicos. Socialmente, a iniciativa promove a criação de empregos locais, diminui a dependência de fontes de energia não renováveis, apoia compromissos internacionais e incentiva a educação ambiental. Por fim, destaca-se a importância da correta gestão dos resíduos sólidos urbanos para viabilizar esses benefícios.

AGRADECIMENTO: Os autores agradecem a Fundação Araucária pelo auxílio financeiro ao projeto por meio da ação NAPI OESTE que tem o objetivo de promover o desenvolvimento econômico sustentável da Região Oeste do Paraná, por meio do engajamento, cooperação e sinergia das pessoas e instituições públicas e privadas. Convênio nº 417/2022, Protocolo FA 19.161.893-9.





REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei Nº 12.205, 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: Diário Oficial da União, 2010.

CAMPOS, F. A. de. **Gestão de Resíduos Sólidos em Foz do Iguaçu:** análise da política pública e seu financiamento. 2023. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Administração Pública e Políticas Públicas, Universidade Federal da Integração Latino Americana - Unila, Foz do Iguaçu, 2023.

CLIMA e condições meteorológicas médias em Marechal Cândido Rondon no ano todo. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/29512/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Marechal-C%C3%A2ndido-Rondon-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 10 out. 2023.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA - COPEL. **Tarifas de energia elétrica.** Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 13 jan. 2024.

ELK, A. G. H. P. van. **Redução de emissões na disposição final.** Rio de Janeiro: IBAM, 2007;

ESMAP – ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME. **Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean.** The World Bank: ESMAP, 2004. 236 p.

FREIRE, V. H. N. **Estimativa do potencial de produção de biogás em um aterro sanitário para aproveitamento energético.** Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2018.

HANSEN, R. **Barracão de triagem amplia estrutura do aterro sanitário municipal.** 2020. Disponível em: <https://www.toledo.pr.gov.br/old/noticia/barracao-de-triagem-amplia-estrutura-do-aterro-sanitario-municipal#:~:text=Ainda%2C%20de%20acordo%20com%20o,deste%20montante%20s%C3%A3o%20res%C3%ADduos%20recicl%C3%A1veis>. Acesso em: 20 dez. 2023.

HARTMANN, R. M.; GARCIA-ACEVEDO, L. E. Thermodynamic assessment of cities applying exergetic efficiency as evaluation index. **Sustain Energy Technol Assess**, v. 50, 2022. Doi: 10.1016/j.seta.2021.101801.

HARTMANN, R. M.; DIAS, A. Metodologia termodinâmica para cálculo de eficiência exergetica em cidades contemporâneas / thermodynamic approach for evaluation of exergetic efficiency of contemporary cities. **International Journal of Environmental Resilience Research and Science**, [S. l.], v. 3, n. 3, 2021. Doi: 10.48075/ijerrs.v3i3.28175.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico 2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014:** Synthesis report. Genebra, Suíça: IPCC, 2015. 151 p. SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Hemisphere, 1988.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.





MARQUES, R. F. de P. V. **Impactos ambientais da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo e na água superficial em três municípios de Minas Gerais.** Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras, 2011. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas.

MATELÂNDIA. **Plano Municipal de Saneamento Básico.** Município de Matelândia, Paraná. 1ª edição, 2016. Gestão municipal 2013-2016. Secretaria Municipal de Agricultura, Meio Ambiente e Desenvolvimento Econômico. 41 páginas.

SINIR – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. **Relatório Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos.** Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/municipal/>. Acesso em: 13 jan. 2024.

VEREADORES da Comissão do Meio Ambiente vistoriam todos os Ecopontos da cidade. 2022. Assessoria do Vereador Professor Santello/CMC. Disponível em: [https://www.camaracascavel.pr.gov.br/comunicacao/noticias/vereadores-da-comissao-do-meio-ambiente-vistoriam-todos-os-ecopontos-da-cidade/#:~:text=O%20aterro%20sanit%C3%A1rio%20de%20Cascavel,100%20mil%20toneladas%20de%20lixo](https://www.camaracascavel.pr.gov.br/comunicacao/noticias/vereadores-da-comissao-do-meio-ambiente-vistoriam-todos-os-ecopontos-da-cidade/#:~:text=O%20aterro%20sanit%C3%A1rio%20de%20Cascavel,100%20mil%20toneladas%20de%20lixo.). Acesso em: 20 dez. 2023.

WYLEN, G. V.; SONNTAG, R.; BORGNACKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** 8. ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2013.

