



## ANÁLISE DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA DE RECIFE

## ANALYSIS OF EXERGETIC EFFICIENCY OF RECIFE

Pedro Vitor Silva<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-7458-5011>

Rafael Figueredo<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-5364-9485>

**Resumo:** O presente trabalho discorre aspectos relacionados à eficiência exergética da cidade de Recife a partir de dados de consumo de combustíveis automobilísticos, gás liquefeito de petróleo e energia elétrica. Dada uma breve introdução sobre os principais aspectos da cidade em questão, observa-se o funcionamento econômico da região voltado ao setor de serviços, o que justifica as proporções de exergia de entrada sendo a gasolina e a energia elétrica os principais vetores exergéticos. Realizada análise da exergia destruída tem-se que a eficiência exergética da cidade é de 22,58%. A partir dos dados de consumo de combustível foi possível estimar as emissões de dióxido de carbono na cidade de Recife, as quais se encontram a aproximadamente 1,5MtCO<sub>2</sub> por ano. Espera-se que os resultados encontrados neste artigo sirvam como referência para futuros trabalhos nesta área para que seja possível comparar as cidades quanto sua eficiência exergética e, assim, fomentar pesquisas que tenham como foco a termodinâmica das cidades.

**Palavras-chave:** Exergia. Recife. Termodinâmica. Cidades.

**Abstract:** The present work discusses aspects related to the exergetic efficiency of the city of Recife from data on consumption of automotive fuels, liquefied petroleum gas and electricity. Given a brief introduction about the main aspects of the city in question, the economic profile of the region aimed at the service sector can be observed, which justifies the proportions of input exergy, with gasoline and electricity being the main exergy vectors. After analyzing the destroyed exergy, the exergetic efficiency of the city is 22.58%. From the fuel consumption data it was possible to estimate the carbon dioxide emissions in the city of Recife, which is approximately 1.5MtCO<sub>2</sub> per year. It is hoped that the results found in this article will serve as a reference for future work in this area so that it is possible to compare cities in terms of their exergetic efficiency and, thus, foster research that focuses on the thermodynamics of cities.

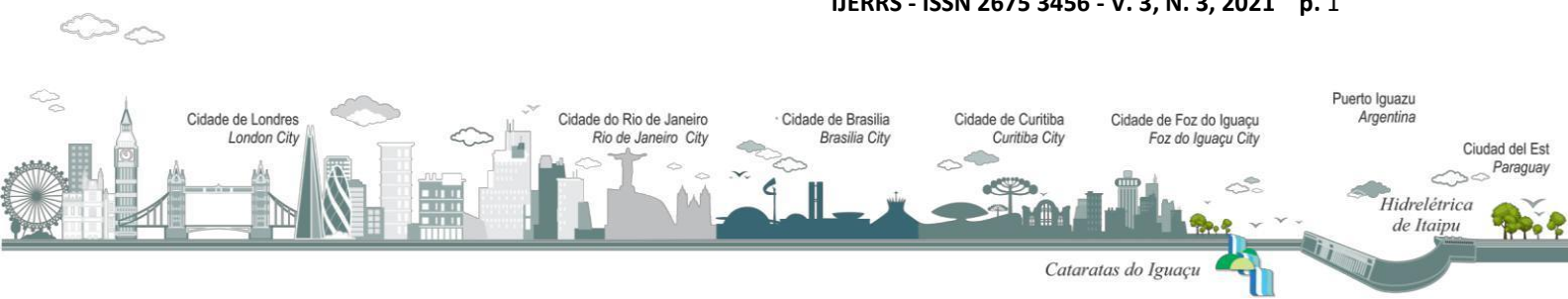
**Keywords:** Exergy. Recife. Thermodynamics. Cities.

## INTRODUÇÃO

A cidade de Recife é a capital do estado de Pernambuco, localizada no nordeste do

<sup>1</sup> Graduando de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. pvid.silva.2016@aluno.unila.edu.br.

<sup>2</sup> Graduando de Engenharia Civil de Infraestrutura da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. ro.figueredo.2016@aluno.unila.edu.br

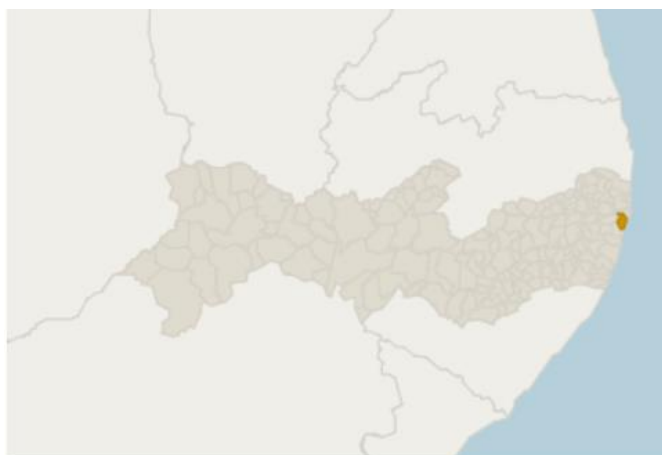




Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), suas coordenadas geográficas são: Latitude 8 04' 03" S e longitude 34 55' 00" W. Possui uma área aproximada de 217,01km<sup>2</sup> e uma população estimada de 1.653.461 pessoas segundo o IBGE, o que resulta em uma densidade demográfica de 7.619 hab/km<sup>2</sup>.

A cidade se encontra a 4 metros acima do nível do mar e sua composição territorial é de 67,43% de morros, 23,26% de planícies, 9,31% de zonas aquáticas e 5,58% de zonas especiais de preservação ambiental (ZEPA). O clima na cidade é tropical úmido, característico de cidades litorâneas, com temperatura média compensada anual de 25,9 °C. Na Figura 1 é possível visualizar a localização geográfica da cidade de Recife, no estado de Pernambuco.

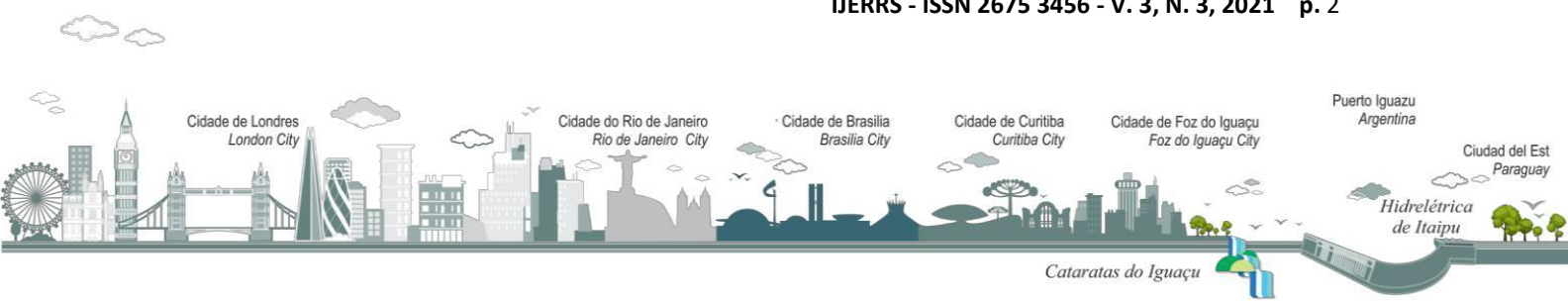
Figura 1 – Localização da cidade de Recife.



Fonte: IBGE, 2021.

Em relação à urbanização, arquitetura e Planejamento Urbano de Recife, nota-se que em termos econômicos, dados de 2018 do IBGE mostram que o Produto Interno Bruto (PIB) da cidade é composto 71,20% por atividades do setor de serviços (do qual se destacam o comércio, a economia criativa e atividades relacionadas à tecnologia de informação e comunicação), 16,08% por atividades do setor público, 12,61% do setor industrial e 0,11% do setor da pecuária. O PIB per capita da cidade é de R\$31.994,38, o salário médio mensal dos trabalhadores formais é de 3,3 salários mínimos e o Índice de Desenvolvimento Humano da cidade de Recife é 0,772 (IBGE, 2021).

O surgimento da cidade de Recife remete ao Século XVI quando, devido a suas





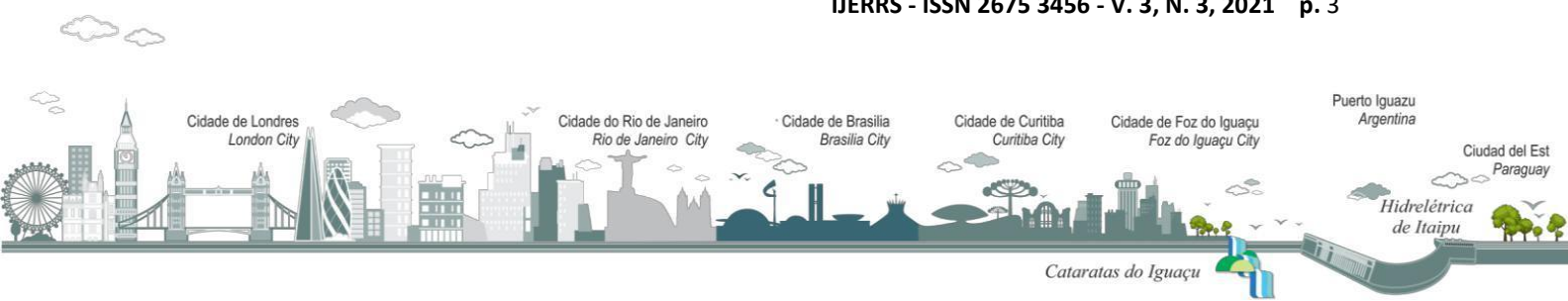
características físicas, foi criado um porto na localidade. Isto impulsionou o seu desenvolvimento e em 1537 foi registrada a Vila de Recife, sendo que com o passar dos anos e a expansão das atividades do porto devido ao comércio açucareiro, a cidade começou a se estruturar (IBGE, 2021).

Em 1630 holandeses invadem e dominam todo o litoral de Pernambuco, estabelecendo-se em Recife por interesses comerciais e pela leve semelhança da cidade com a Holanda. Poucos anos depois, com a designação do conde João Maurício de Nassau Siegen como governador geral da Província, a cidade de Recife passa por uma transformação em ritmo acelerado com a vinda de especialistas que iniciaram a construção de uma cidade planejada. Sendo assim, surgem os primeiros traços da arquitetura recifense através dos palácios, do horto zoo-botânico, canais e pontes.

Na segunda metade do Século XVII os portugueses retomam o domínio da cidade, assim, a urbanização portuguesa incide sobre o território, como forma de contrapor a estrutura implantada pelos holandeses, o que justifica as ruas estreitas que se abrem em pátios abertos dando destaque para as construções religiosas de origem católica (REYNALDO *et al.*, 2013).

A estrutural colonial, marcada pela presença dos engenhos de açúcar e uma ocupação urbana restrita a determinadas localidades se manteve até meados do Século XIX, quando em 1840 iniciou-se um processo de modernização, expansão e regularização da cidade para comportar o crescimento demográfico e econômico da época (REYNALDO *et al.*, 2013). Desenvolveram-se planos urbanísticos que orientaram a estrutural urbana de Recife, com característica radiocêntrica e direcionando a 5 regiões (norte, sul, sudeste, oeste e noroeste) como um formato de estrela.

Sendo assim, Recife manteve uma tradição na área de planejamento urbano, pois foram desenvolvidos diversos planos para a cidade de Recife na perspectiva de Embelezamento e Higienismo durante o Século XX. Neste aspecto, destaca-se a atuação do engenheiro Saturnino De Brito nas 2 primeiras décadas, responsável por projetos de redes de esgoto e a elaboração de regulamentos de construção em Recife. Posteriormente, segundo Nunes (2013), "partir dos anos 1960/70 as propostas se apresentavam dentro da perspectiva do planejamento regulatório, seja o planejamento físico territorial clássico, ou o planejamento sistêmico e racional". Neste Aspecto, a exemplo, Recife foi a primeira cidade do Brasil a





legislar sobre Zonas Especiais de Interesse Social através da Lei municipal de uso e ocupação do solo nº 14.511 de 1983.

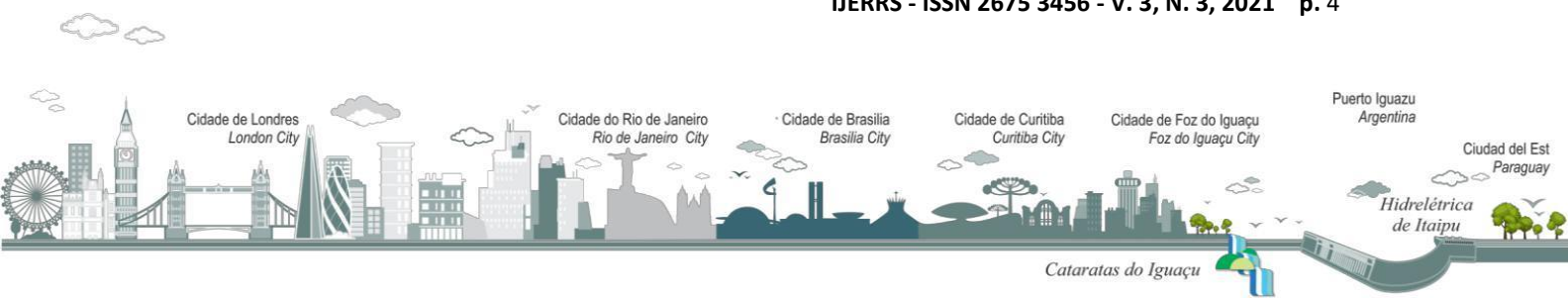
O processo de urbanização mais recente da cidade de Recife é caracterizado por intensa verticalização de edifícios para utilização mais eficiente do pouco espaço para acomodar uma grande população. Além da quantidade de habitantes, a necessidade de centralizar o comércio, mercado e serviços também foi de influência muito grande para acentuar a verticalização. Em alguns bairros é possível encontrar construções antigas perto dos edifícios modernos, o que demonstra como foi acelerado o processo de verticalização. Outro fator de urbanização que se destacou no século XX foi o alargamento das ruas e avenidas, um processo que ocorreu de forma natural e indutiva, facilitando a mobilidade urbana conforme a necessidade. Na Figura 2 é possível visualizar uma imagem aérea de um bairro de Recife.

Figura 2 – Vista aérea de um bairro de Recife, Pernambuco.



Fonte: Sol Pulquério/PCR apud Recife, 2021.

Sobre os aspectos culturais de Recife, percebe-se que a cidade abriga povos de várias procedências, os quais possuem diferentes crenças, valores e culturas diferentes. Esta diversidade enriqueceu de forma intensa e criativa a produção cultural do local, o que contribuiu para uma cultura popular forte. A partir de um riquíssimo patrimônio cultural gerado por este hibridismo etnográfico, Recife tem seu patrimônio constituído por bens tangíveis e intangíveis. Seu patrimônio cultural é mantido com a representação de seu povo que o





expressa através do comércio, culinária, festivais, religião os quais dão sentidos às ruas, praças e igrejas (RECIFE, 2008).

A mobilidade urbana em Recife, assim como a grande maioria das cidades brasileiras, é o transporte rodoviário como o principal meio de deslocamento, utilizando veículos movidos à combustão. A exceção ocorre no transporte coletivo urbano, em que a Companhia Brasileira de Trens Urbano (CBTU, 2021) opera 3 linhas férreas, sendo 2 eletrificadas e 1 com composições a diesel". A frota da cidade de Recife é composta por 712.575 veículos, dos quais 416.140 são automóveis e 146.301 são motocicletas.

Os resíduos sólidos urbanos da cidade de Recife são geridos de acordo com a política estadual de resíduos sólidos criada pela lei ordinária 14.236/2010. De acordo com os últimos dados de geração de resíduos sólidos urbanos, em 2014 a cidade de Recife gerou 836.640 toneladas de resíduos, o que para o ano representava uma geração de 1,45 kg/hab.dia. Sendo que estes valores abrangem resíduos domiciliares, de poda e recicláveis (RECIFE, 2014).

O presente trabalho discorre aspectos relacionados à eficiência exérgica da cidade de Recife a partir de dados de consumo de combustíveis automobilísticos, gás liquefeito de petróleo e energia elétrica.

## METODOLOGIA

Segundo Bristow (2013), a análise exérgica de cidades considera que a energia que ingressa nas cidades passa por uma série de transformações com o intuito fornecer a energia necessária para as atividades urbanas. Neste processo ocorrem perdas e irreversibilidades, por isso, utiliza-se conceitos da Segunda Lei da Termodinâmica, como a exérgia, que corresponde a quantidade útil de energia em processo observado em um ambiente de referência.

A Figura 3 ilustra, de maneira simplificada, um exemplo de análise exérgica feita para uma cidade, sendo delimitado um volume de controle no qual ingressam diversos insumos e os combustíveis fornecem exérgia para a cidade, a qual se transforma em trabalho (destruição de exérgia) e os insumos em resíduos urbanos. Na transformação da exérgia em trabalho e na geração de resíduos sólidos urbanos, há a produção de gases poluentes no ambiente.

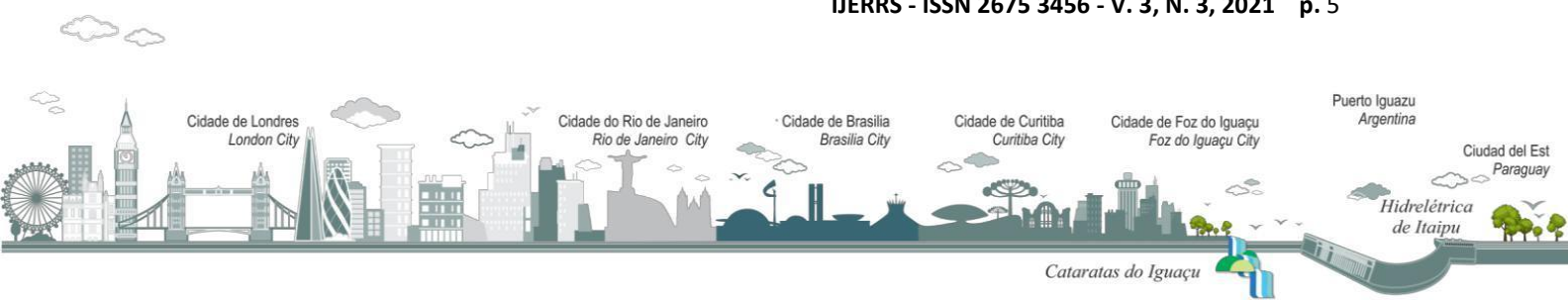
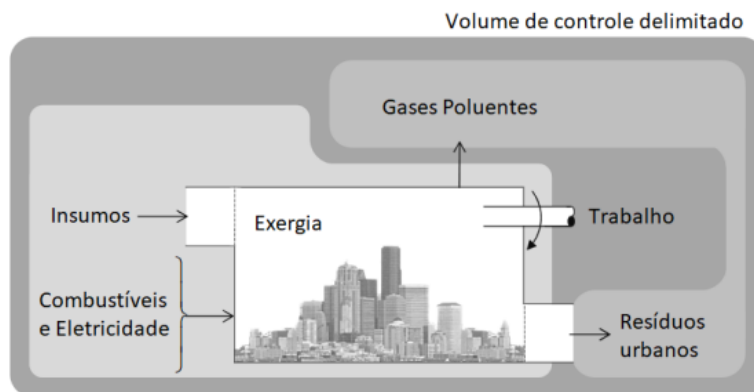




Figura 3 – Representação simplificada da análise exérgica da cidade



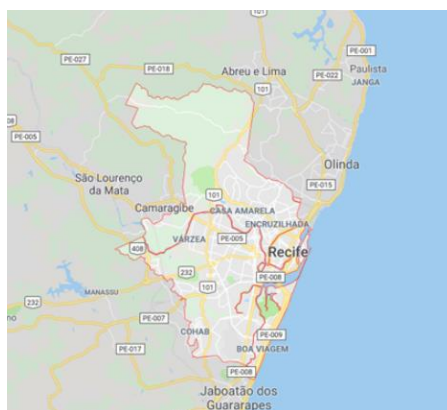
Fonte: Adaptado de Bristow, 2013.

Além da metodologia acima, observou-se também a metodologia discutida na disciplina Termodinâmica das Cidades do curso de engenharia de energia da UNILA, apresentada por Hartmann e Dias (2021) no artigo “Metodologia termodinâmica para cálculo de eficiência exérgica em cidades modernas”, componente introdutório desta edição da revista.

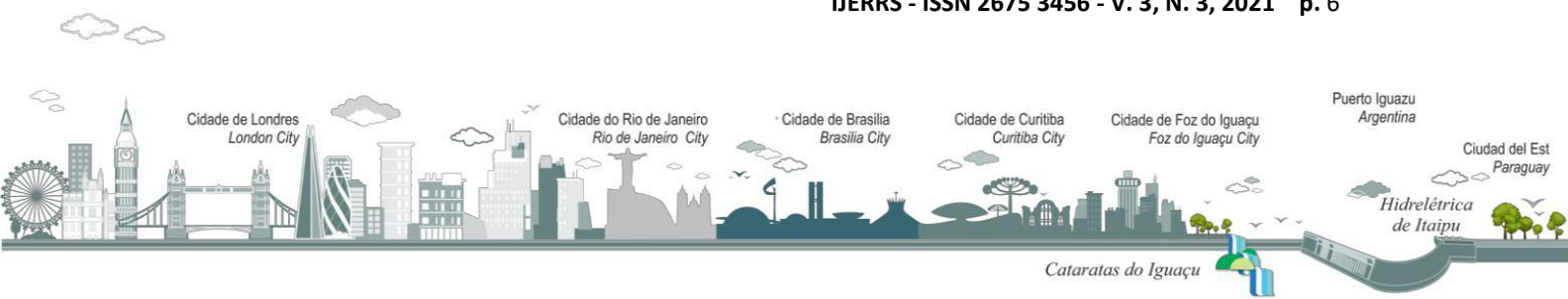
## DELIMITAÇÃO DO VOLUME DE CONTROLE

O estudo exérgico da cidade de Recife iniciou pela delimitação do volume de controle, o qual corresponde aos limites geográficos da cidade de Recife, conforme Figura 4.

Figura 4 – Delimitação do volume de controle considerado para a cidade de Recife



Fonte: Google Maps, 2021.





O ingresso de insumos na cidade do Recife ocorre pelos seguintes meios: a) Marítimo: pelo Porto de Recife; b) Rodoviário: pelas rodovias, a norte, BR-101, PE-009 e PE-015, a oeste pelas BR-232, BR-408 e PE-005, a sul pelas BR-101, PE-007, PE-008, PE-009 e PE-015; c) Aéreo, pelo Aeroporto Internacional de Recife/Guararapes - Gilberto Freire.

A exergia da cidade é, neste trabalho, dividida em exergia de entrada, obtida a partir dos combustíveis, e exergia destruída, que decorre do aproveitamento da utilização da exergia em trabalho.

## CÁLCULO DA EXERGIA DE ENTRADA

Para o cálculo da exergia de entrada, inicialmente, foram obtidos dados de consumo dos combustíveis (Gasolina, Óleo Diesel, Etanol e Gás Liquefeito de Petróleo) e da eletricidade na cidade de Recife. Com isto, a exergia foi calculada aplicando-se equações adequadas, conforme descrito abaixo. Para o caso dos combustíveis como a Gasolina, Óleo Diesel e Etanol, os dados foram obtidos em unidades de volume (litros). Portanto, aplicou-se a seguinte equação para cálculo da exergia de entrada:

$$E_{entrada,i} = 4184 * V_i * \rho_i * PCI_i * \alpha_i * 10^{-9} \quad (1)$$

Sendo que,  $E_{entrada,i}$  é a exergia de entrada do combustível  $i$  em GJ,  $V_i$  é o volume de combustível em litros,  $\rho_i$  é a densidade do combustível em kg/l,  $PCI_i$  é o poder calorífico inferior em kcal/kg e  $\alpha_i$  é um fator para obter a exergia do combustível. Os dados de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) foram obtidos diretamente em unidades de massa (quilogramas), logo, foi aplicada a equação abaixo para cálculo da exergia de entrada:

$$E_{entrada,i} = 4184 * m_i * PCI_i * \alpha_i * 10^{-9} \quad (2)$$

Em que  $m_i$  é a massa de GLP, em kg.

A Tabela 1 apresenta os valores referentes a densidade, poder calorífico inferior e fator alfa para os combustíveis considerados.

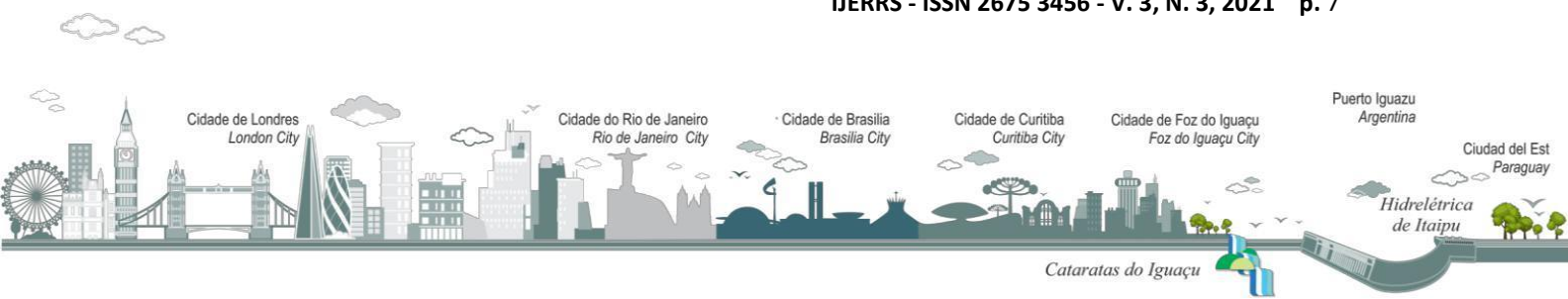




Tabela 1 – Densidade, poder calorífico inferior e fator alfa dos combustíveis.

Combustível	Densidade (kg/l)	PCI(kcal/kg)	□
Gasolina	0,75425	9400	1,07
Óleo Diesel	0,84	10100	1,06
Etanol	0,809	6300	1,08
GLP	-	11100	1,05

Fonte: os autores, 2021.

Por fim, para o caso da eletricidade, os dados já são fornecidos em unidades de energia (kWh), logo, apenas houve a transformação para GJ, obtendo-se assim a exergia.

## CÁLCULO DA EXERGIA DESTRUÍDA E EFICIÊNCIA EXERGÉTICA

A exergia destruída é proporcional a eficiência exergética dos processos em que os combustíveis e a eletricidade são empregados para realizar trabalho. O cálculo da exergia destruída é feito aplicando a seguinte equação:

$$E_{destruída,i} = E_{entrada,i} * (100 - \eta_{II,i}) \quad (3)$$

A Tabela 2 apresenta os percentuais de eficiência exergética de alguns dos processos nos quais os combustíveis e a eletricidade são utilizados.

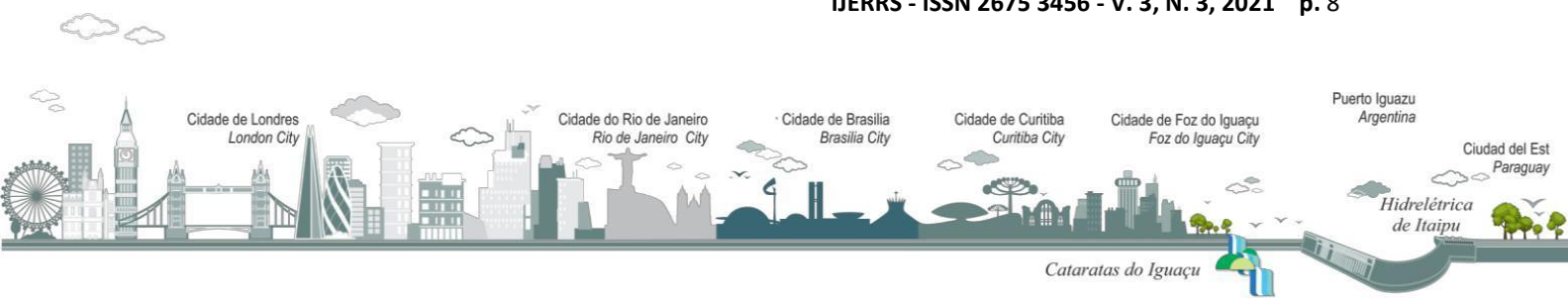
Tabela 2 – Eficiência exergética de processos.

Processo	Eficiência exergética (%)
Motores a combustão	25
Motores elétricos	76
Consumo de eletricidade (doméstico e comercial)	11,5
Fornos a GLP ou gás natural	14,5

Fonte: os autores, 2021.

Obtidos os dados de exergia de entrada e exergia destruída, é possível calcular a eficiência exergética aplicando a equação:

$$\eta = 1 - \left( \frac{\sum E_{destruída,i}}{\sum E_{entrada,i}} \right) \quad (4)$$

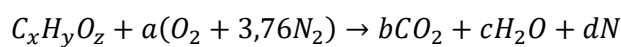






## CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DEVIDO A COMBUSTÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Um dos produtos da realização de trabalho na cidade utilizando os combustíveis, especialmente os combustíveis fósseis provenientes do petróleo, são os gases poluentes. A combustão promove a liberação do gás carbônico (CO<sub>2</sub>), uma das principais fontes de poluição da atmosfera, através da seguinte equação estequiométrica:



Os índices x, y e z são obtidos a partir da fórmula química de cada combustível, conforme Tabela 3:

Tabela 3 – Fórmula química dos combustíveis.

Combustível	Fórmula Química
Gasolina	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
Óleo Diesel	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
GLP	C <sub>3,5</sub> H <sub>9</sub>

Fonte: os autores, 2021.

O cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> devido a combustão dos combustíveis é iniciado pela determinação do fator de CO<sub>2</sub>:

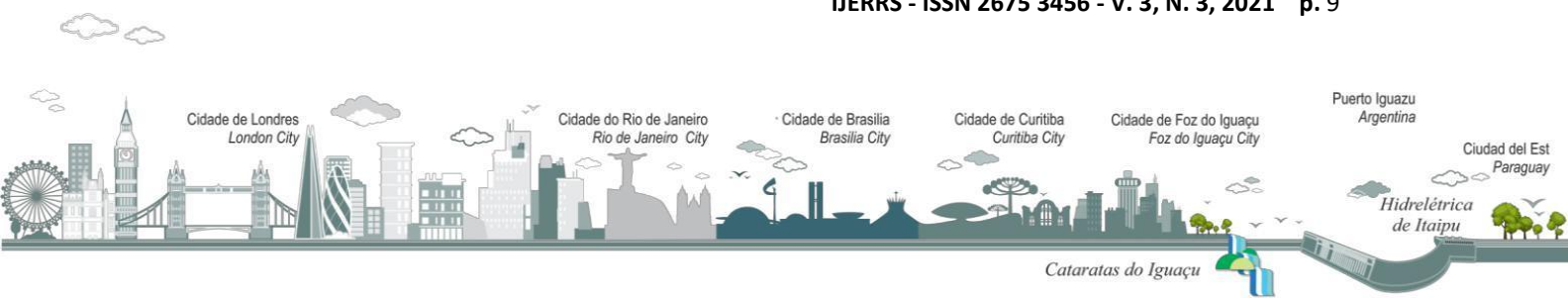
$$FatorCO_{2,i} = \frac{x * MMCO_2}{12x + y + 16z} \quad (5)$$

Em que,  $MMCO_2$  é a massa molar do gás carbônico, 44kg/kmol.

Posteriormente, calcula-se a massa de CO<sub>2</sub> emitida pelo combustível utilizando a equação abaixo:

$$massaCO_{2,i} = FatorCO_{2,i} * V_i * \rho_i \quad (6)$$

Sendo que a  $massaCO_{2,i}$  é obtida em kg.





## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### EXERGIA DE ENTRADA

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para o cálculo da exergia de entrada para cada combustível. Os dados do consumo de gasolina, óleo Diesel, etanol e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) foram obtidos a partir de dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Já os dados referentes a Energia Elétrica foram obtidos na Base de Dados do Estado (BDE) de Pernambuco, em site disponibilizado pelo Governo do Estado de Pernambuco, sendo que a distribuição da energia elétrica é realizada pela Companhia Energética de Pernambuco (Celpe).

Tabela 4 – Resultados de exergia de entrada.

Combustível	Consumo	Exergia de entrada (GJ)	(%)
Gasolina (l)	347.306.358	11.023.800	32,73
Óleo Diesel (l)	151.778.532	5.710.952	16,95
Etanol (l)	122.112.000	2.812.307	8,35
GLP (kg)	43.010.747	2.097.398	6,23
Energia Elétrica (MWh)	3.343.848	12.037.852	37,74
	Total	32.329.672	100

Fonte: os autores, 2021.

Pode-se observar que as maiores quantidades de exergia são para a gasolina e para a energia elétrica, isto se deve ao fato de Recife ser uma cidade de serviços, portanto há muita energia elétrica que é utilizada para iluminação e refrigeração e muitos veículos trafegam, pois a maioria dos trabalhadores possuem carros particulares.

### EXERGIA DESTRUÍDA

A partir das tabelas de eficiência exergética dos combustíveis e da exergia de entrada, pode-se calcular a exergia destruída, a qual representa o potencial de trabalho perdido (Tabela 5). É importante ressaltar que a eficiência adotada para a energia elétrica se deve ao fato da cidade de Recife possuir veículos elétricos sobre trilhos.

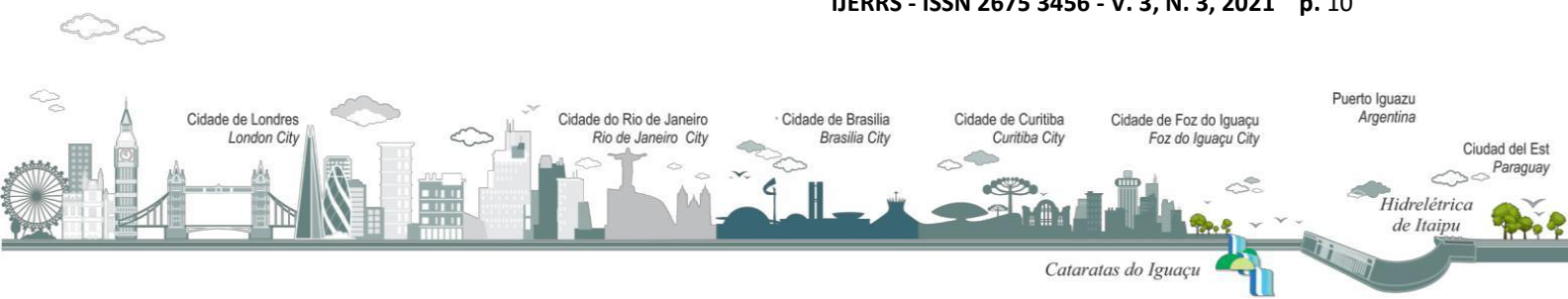




Tabela 5 – Resultados de exergia destruída.

Combustível	Eficiência adotada (%)	Exergia destruída (GJ)	(%)
Gasolina	25	8.267.850	31,71
Óleo Diesel	25	4.283.214	16,43
Etanol	25	2.109.230	8,09
GLP	14,9	1.784.886	6,84
Energia Elétrica	20	9.630.282	36,93
Total		26.075.464	100

Fonte: os autores, 2021.

## EFICIÊNCIA EXERGÉTICA

Com os resultados de exergia de entrada e exergia destruída, foi possível calcular a eficiência energética da cidade de Recife utilizando a equação (4):

$$\eta = 1 - \left( \frac{\sum E_{destruída,i}}{\sum E_{entrada,i}} \right) = 1 - \left( \frac{26.075.464,17}{32.329.672,48} \right) = 0,2258$$

Ou seja, a eficiência energética da cidade de Recife a partir dos cálculos realizados e das informações obtidas é de 22,58%.

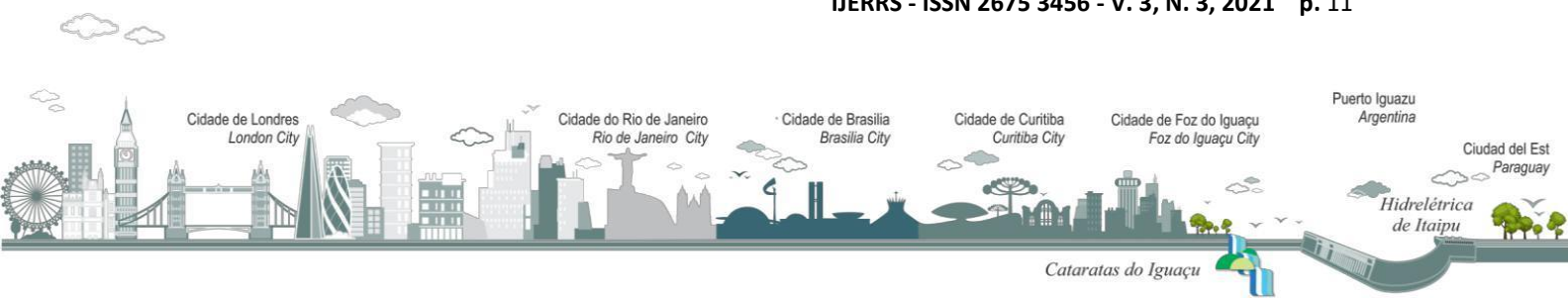
## EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DEVIDO A COMBUSTÃO DOS COMBUSTÍVEIS

A Tabela 6 apresenta os resultados referentes ao cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> devido a combustão dos combustíveis utilizando as equações (5) e (6).

Tabela 6 – Resultados de emissão de CO<sub>2</sub>.

Combustível	Fator de CO <sub>2</sub>	Massa de CO <sub>2</sub> (kg)	(%)
Gasolina	3,087719	808.845.964	53,04
Óleo Diesel	3,115044	397.149.316	26,04
Etanol	1,913043	188.986.855	12,39
GLP	3,019608	129.875595	8,52
Total		1.524.857.731	100

Fonte: os autores, 2021.

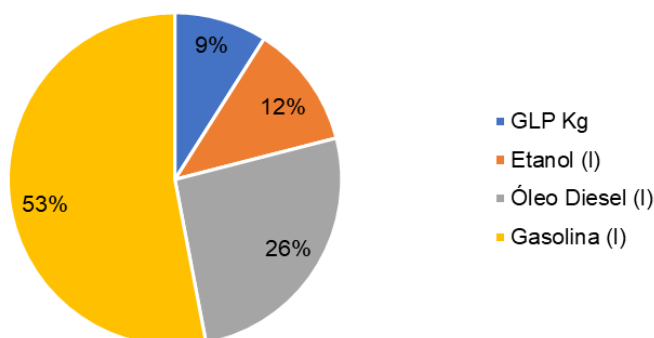




Na Figura 5 é possível visualizar a porcentagem de emissão de CO<sub>2</sub> de cada combustível devido à combustão.

Figura 5 – Gráfico da parcela de emissões de CO<sub>2</sub> por combustível.

Parcela de emissões de CO<sub>2</sub> por combustível

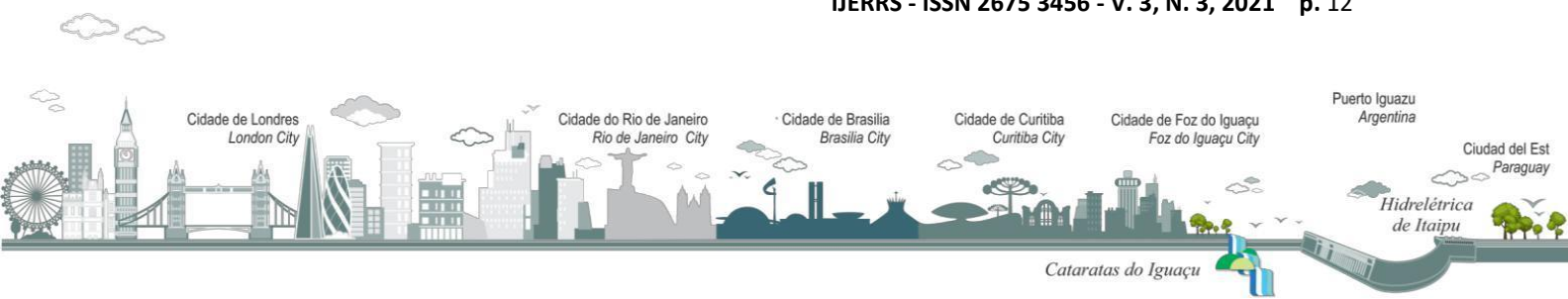


Fonte: os autores, 2021.

As emissões totais de CO<sub>2</sub> chegam a 1,5MtCO<sub>2</sub> para um ano. Aqui, novamente a gasolina se destaca como principal emissor, o que indica a necessidade de ampliação da utilização de meios de transporte elétricos, assim, investimentos em veículos leves sobre trilhos ou metrô são justificados. Contudo, é fundamental a realização de uma análise econômica e estudos de fluxo de tráfego para compreender como implementar linhas de transportes elétricos. Incentivar o uso de meios de transportes de baixa emissão de CO<sub>2</sub> como patinetes elétricos e bicicletas utilizando-se faixas especiais também é uma maneira interessante de reduzir as emissões de gás carbônico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente trabalho, foi possível calcular a eficiência exérgica da cidade de Recife, utilizando dados da exergia de entrada dos combustíveis e o quanto desta exergia foi destruída nos processos que resultam em trabalho. Além disso, obteve-se as emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) gerada pela combustão dos combustíveis nos processos.





Dentre as dificuldades para a realização do presente trabalho, destaca-se a dificuldade para obter dados de todos os combustíveis disponíveis na cidade, como o gás natural. A distribuição de gás natural em Recife é feita pela Companhia Pernambucana de Gás (Copergás) e os dados de consumo do referido combustível não são públicos, mesmo após contato com a distribuidora, não foi possível obter os valores. Portanto, para que a análise exergética seja aprimorada, faz-se necessária a obtenção deste dado.

O valor da eficiência exergética obtido foi de 22,58%, considerado baixo. Observando as características da cidade de Recife apresentada na Introdução, justifica-se o valor encontrado por Recife ser uma cidade de altas temperaturas (ou seja, com uso de equipamentos refrigeradores com baixa eficiência exergética, como ar-condicionado), com matriz econômica fortemente baseada no setor de serviços e mobilidade urbana que utiliza basicamente veículos movidos a combustão, com exceção dos trens elétricos.

Através do presente trabalho, foi possível calcular a eficiência exergética da cidade de Recife, utilizando dados da exergia de entrada dos combustíveis e o quanto desta exergia foi destruída nos processos que resultam em trabalho. Além disso, obteve-se as emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) gerada pela combustão dos combustíveis nos processos.

Por fim, também se recomenda um estudo mais aprofundado quanto aos resíduos urbanos, especialmente aos resíduos sólidos urbanos, para que sejam considerados na análise exergética da cidade.

## REFERÊNCIAS

BRISTOW, D. **Thermodynamics and the Sustainability of Cities**. 2013. 156f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - University of Toronto, Toronto, 2013.

CBTU. Companhia Brasileira de Trens Urbano. **Frota Recife**. 2021. Disponível em: <<https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/empresa-recife>> . Acesso em: 26 ago. 2021.

HARTMANN R. M. **Roteiro para cálculo de emissões de CO<sub>2</sub> oriundas de combustão de combustíveis líquidos e gasosos**. Foz do Iguaçu: UNILA, 2021.

IBGE. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2020**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>> Acesso em: 24 de mai. de 2021.

IBGE. **Cidades: Recife**. 2021 Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife>> Acesso em: 24 de mai. de 2021.

