



METODOLOGIA TERMODINÂMICA PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA EXERGÉTICA EM CIDADES CONTEMPORÂNEAS

THERMODYNAMIC APPROACH FOR EVALUATION OF EXERGETIC EFFICIENCY OF CONTEMPORARY CITIES

Ricardo Morel Hartmann¹

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

Acires Dias²

<https://orcid.org/0000-0001-6819-7469>

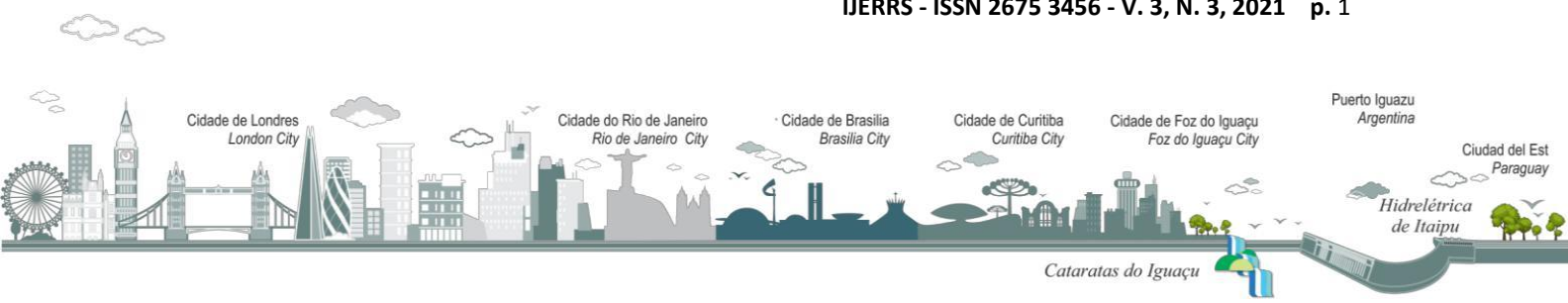
Resumo: O crescente interesse por sustentabilidade energética induz a procura por ferramentas teóricas concisas para o cálculo e comparação de parâmetros de interesse. O cálculo de eficiência termodinâmica para avaliação das cidades e sua analogia com máquinas térmicas é indicado para o estudo de cidades sustentáveis. No entanto, o cálculo de eficiência termodinâmica de máquinas térmicas aplicados a cidades tem uma dificuldade principal: a definição formal de fluxo de produção das cidades em termos de propriedades termodinâmicas, e que seja aplicável para qualquer cidade independente de sua formação histórica, localização, clima, cultura, economia, etc. Este artigo visa estabelecer o arcabouço teórico para cálculo da produção das cidades através de propriedades termodinâmicas, a dinâmica de consumo e transformação de massa e energia dentro das cidades, geração de irreversibilidades e a aplicação da propriedade exergia como parâmetro universal de análise termodinâmica das cidades. Para exemplificar, apresentam-se valores obtidos para eficiência exergética de cinco cidades da América Latina, apresentados em seminário acadêmico sobre eficiência das cidades dentro do escopo de avaliação de disciplinas optativas do curso de engenharia de energia da UNILA.

Palavras-chave: Eficiência exergética. Combustíveis. CO₂ equivalente. Cidades inteligentes. Termodinâmica.

Abstract: The increasingly search for sustainability induces development of concise theoretical tools for comparison of parameters of interest. Thermodynamic tools for assessment of machines and thermal systems are indicated for this task. Thus, calculation of thermodynamic efficiency of cities as an analogy to efficiency of thermal machines is indicated for studies of sustainable cities. However, the utilization of the concept of efficiency applied to assessment of cities has a main difficult: the formal definition of production flux of the cities in terms of thermodynamical properties, independently of their cultural background, geography, population, climate, economic profile, etc. This paper focuses on define the theoretical basis to assess the production flux of the cities in terms of thermodynamical properties, their inner dynamics of transformation of mass and energy, generation of irreversibilities and application of the property exergy as an universal parameter for thermodynamical assessment of cities. As results, it was presented figures of exergetic efficiency of five cities in Latina America, produced during academic seminars of the discipline Thermodynamic of Cities of the faculty of

¹ Prof^o Dr. do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Integração Latino-americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. ricardo.hartmann@unila.edu.br

² Prof^o Dr. aposentado Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. acires.dias.dias@gmail.com.





Engineering Energy of the Federal University of Latin-america Integration.

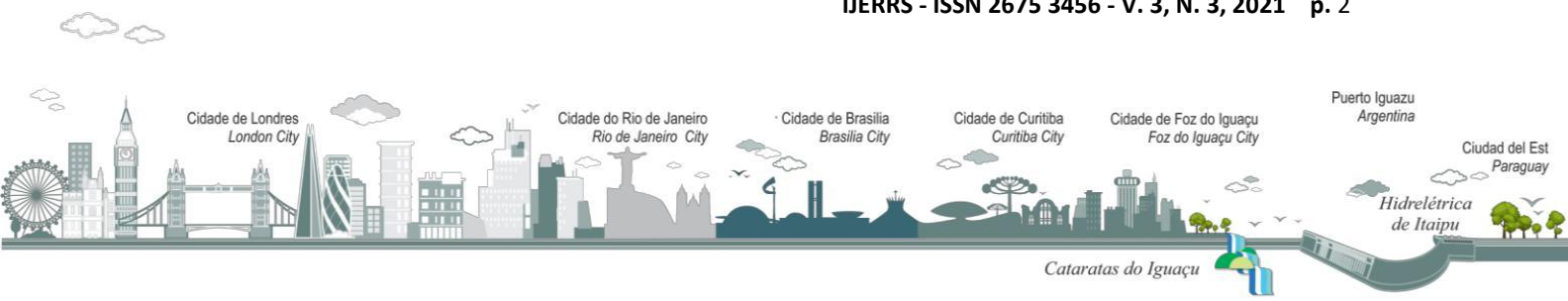
Keywords: Exergetic efficiency. Fuels. Equivalent CO₂. Smart cities. Thermodynamic.

INTRODUÇÃO

A cidade pode ser definida sob vários pontos de vista, mas um dos mais aceitos por sua objetividade é de que a cidade é um *lócus* de assentamento humano (GOODALL, 1987), um local onde vivem pessoas sob organização social. Esta é uma definição do ramo da geografia, mas há também perspectivas históricas na definição das cidades. Benevolo (1980) definiu as cidades em termos históricos, mostrando que conforme estas foram evoluindo, foram estabelecendo-se como um *lócus* privilegiado para aplicação de autoridade. Desta forma, o surgimento das cidades é entendido como consequência do aumento da complexidade dos agrupamentos humanos, induzindo a necessidade de novas hierarquias de autoridade política, comercial, militar, religiosa, etc.

As primeiras cidades datam de aproximadamente 7.000 anos atrás e a partir disso foram evoluindo conforme a dinâmica da população local, se diferenciando a partir de núcleos urbanos com funções religiosas e de comércio rudimentar (BENEVOLO, 1980). Esta evolução foi se aprofundando durante os séculos até que no ano 2.000 A.C. aproximadamente, a primeira cidade naval foi historicamente registrada na Suméria. O aparecimento das cidades navais foi muito importante para o desenvolvimento do comércio bem como das trocas culturais. Durante os milênios seguintes as cidades evoluíram sem mudanças disruptivas, apenas consolidando seu caráter de centro político, religioso, militar, cultural e de comércio. Foi somente durante a 1ª revolução industrial que as cidades passaram novamente por grandes mudanças estruturais, se configurando então como *locus* das indústrias e recebendo a partir disto grande contingente populacional (BENEVOLO, 1980). Atualmente, as cidades contemporâneas são centros de produção industrial, prestação de serviços, comércio, educação, entretenimento, saúde e cultura, podendo ser especializadas em um ou mais setores econômicos.

Pensando em termos de sistemas, uma outra forma de se analisar as cidades é considerando-as como organismos vivos. Com isso, têm-se a implicação de que a cidade





consome massa e energia e deve também rejeitar uma determinada quantidade de massa e energia. A massa rejeitada tem sido um problema importante para as cidades modernas, seja a massa rejeitada por meio de efluente líquidos, gases poluentes ou através de resíduos sólidos urbanos (RSU).

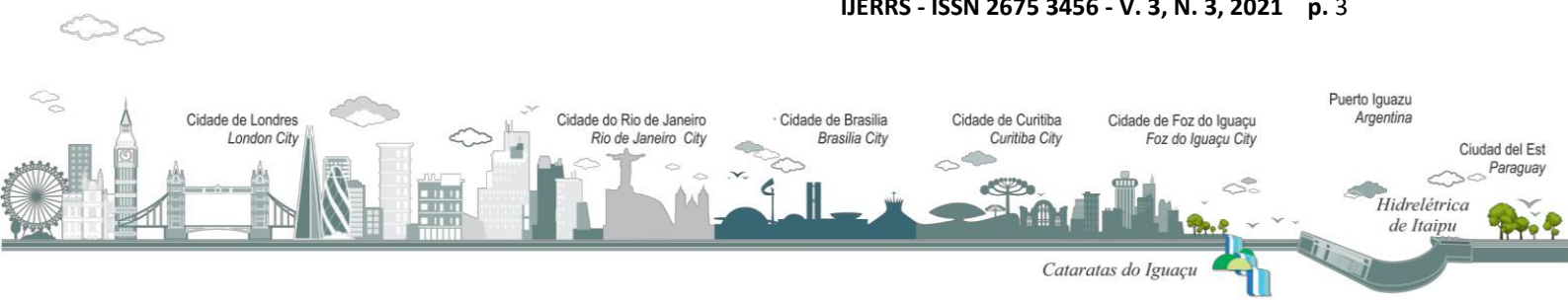
É interessante notar que historicamente as cidades sempre geraram resíduos, em maior ou menor grau dependendo do seu tamanho e, estes resíduos, seu consumo de massa e energia, nunca foram analisados sob um ponto de vista termodinâmico, até porque a termodinâmica surgiu no século XIX, sendo, portanto, muito mais jovem do que as cidades. Neste particular, é importante comparar que as máquinas térmicas foram inventadas e desenvolvidas em paralelo com a termodinâmica, em um processo retroalimentado.

Segundo Thurston (1886), à medida que avançava a necessidade de melhorias das máquinas térmicas para movimentar a revolução industrial avançavam também os estudos termodinâmicos sobre desempenho energético e eficiência. Esse processo retroalimentado, no entanto, não ocorreu para o desenvolvimento das cidades, e por isso são raros os trabalhos de análise termodinâmica das cidades.

Em termos epistemológicos, o estudo teórico das cidades sempre foi um ramo da geografia. A partir da década de 1990 começaram a ser propostos trabalhos analisando as cidades sob uma perspectiva multidisciplinar, com as primeiras publicações sobre urbanização sustentável e crescimento inteligente (ALBINO; BERARDI; DANGELICO, 2015; EGER, 2009; SUSANTI *et al.*, 2016).

Krugman, (1993) foi um dos pioneiros em analisar as relações geografia-economia, avaliando a influência da localização das cidades no seu crescimento. Glaeser (2011) apresentou uma análise histórica da evolução das cidades discutindo o papel do conhecimento no crescimento das cidades, mostrando que o conhecimento tem papel primordial no crescimento das cidades. Atualmente, conceitos de economia circular vêm se tornando mais popular (KHAN; KABIR, 2020; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; NELLES; GRÜNES; MORSCHECK, 2016; PELOROSSO; GOBATTONI; LEONE, 2017), aumentando assim a utilização das discussões econômicas como ferramenta teórica para avaliação das cidades.

Em termos de análise termodinâmica Pelorosso *et al.* (2017) discutiram o conceito de cidade de baixa entropia, procurando obter uma metodologia genérica capaz de ser





replicável para qualquer cidade, sendo então correlacionada com conceitos de cidades com alta eficiência exérgica. Purvis e Mao (2017) discutiram a aplicação da propriedade entropia como indicador de sustentabilidade urbana. Eles argumentaram que não é possível utilizar a propriedade entropia para quantificar a degradação dos fluxos materiais dentro da cidade uma vez que não há na termodinâmica um conceito de “utilidade material”.

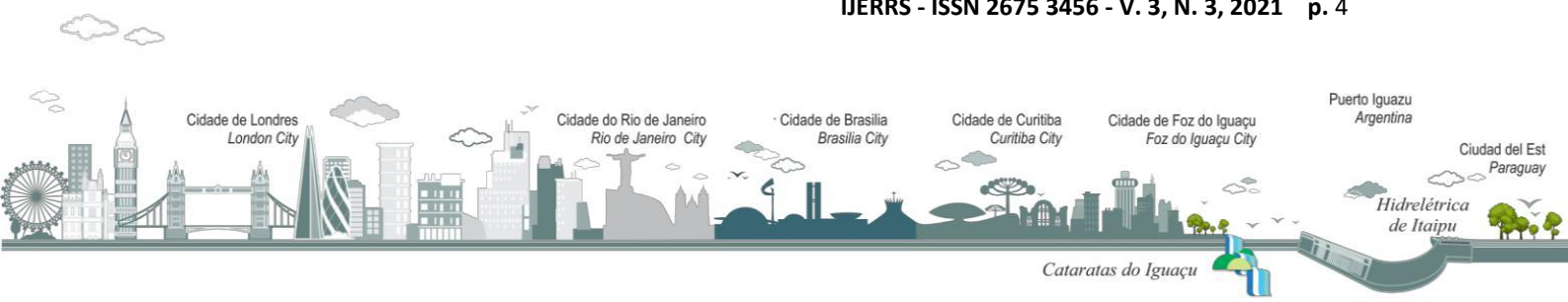
No entanto, há sim na termodinâmica um conceito de disponibilidade energética, a propriedade exérgia. Purvis e Mao (2017) sugeriram então utilizar análise exérgica e estratégias de economia circular para se aumentar a sustentabilidade de ambientes urbanos. Bristow e Kennedy (2015) apresentaram um estudo de termodinâmica do não-equilíbrio baseado no conceito de estruturas dissipativas, tentando responder ao questionamento “porque as cidades crescem?”.

Bristow e Kennedy (2015) apresentaram resultados de intensidade energética versus densidade populacional para 22 cidades. Observou-se que a intensidade energética aumenta com uma taxa maior do que a taxa de crescimento populacional das cidades e concluiu-se pela necessidade de desenvolver estudos adicionais para se obter uma metodologia consistente para avaliação de fluxos exérgicos dentro das cidades, focando em processos de microescala que ocorrem no interior das cidades.

Almasri *et al.* (2020) realizaram análise exérgica do setor residencial na arábia saudita. Foi apresentada uma revisão sobre análise exérgica do setor residencial para 11 países, mostrando resultados de eficiência exérgica de 16 equipamentos eletrodomésticos. Apresentou-se também uma análise conjunta sobre consumo anual dos 16 eletrodomésticos selecionados em conjunto com a eficiência exérgica de cada equipamento e calcularam a eficiência exérgica do setor residencial da Arabia Saudita como sendo 11,38%.

Xu e Ang (2014) apresentaram um estudo sobre consumo energético no setor residencial em Cingapura, aplicando o método de análise de decomposição de indicadores para os anos de 2000 e 2010. O setor residencial foi então dividido em 6 grupos distintos por área construída e por população. Para cada grupo, foi realizada pesquisa e então obtida a fração de equipamentos eletrodomésticos bem como consumo energético.

Zheng *et al.* (2020) apresentaram uma ampla revisão bibliográfica sobre publicações





referentes a cidades inteligentes entre 1990 e 2019, analisando 7.380 publicações. As publicações foram categorizadas conforme normas da WoS (*Web of Science*), sendo 35,05% na categoria engenharia elétrica/eletrônica, 21,98% na categoria ciências da computação e sistemas de informação, 20,18% telecomunicações e 19,95% métodos teóricos de ciências da computação. Não foi identificada nenhuma categoria relacionada a termodinâmica. As publicações foram também categorizadas em 9 *clusters*, identificando poucas publicações com análises termodinâmicas aplicadas a cidades inteligentes.

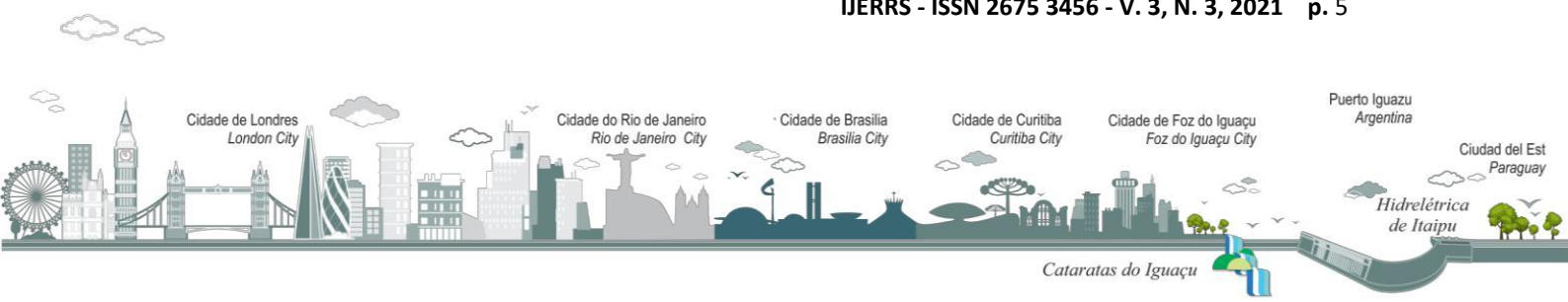
Yu e Zhang (2019) investigaram eficiência energética de cidades inteligentes na China. Foram analisadas 251 cidades entre 2003 e 2016 aplicando a metodologia de análise de metafronteira de dados. Os dados de consumo de energia das 251 cidades foram comparados para avaliar os efeitos de políticas de cidades inteligentes na eficiência energética das cidades, porém não foram realizadas análises do comportamento energético interno nas cidades. Yu e Zhang (2019) reivindicaram que eles apresentaram a primeira análise sistemática de eficiência energética de cidades na China, e observaram uma dependência espaço-temporal da eficiência energética que cresceu entre 2003 e 2016 após a implantação de políticas de cidades inteligentes.

Há ainda indicadores mais genéricos que são utilizados para fazer comparações entre as cidades contemporâneas, sob os aspectos de sustentabilidade ou da “inteligência” da cidade, que poderão se servir da técnica apresentada neste artigo para comparação entre diferentes cidades.

O principal objetivo deste artigo é então contribuir com a literatura revisada, apresentando o estudo de eficiência exergética para cidades contemporâneas, analisando o comportamento exergético das cidades a partir de uma ferramenta de análise termodinâmica, aplicável para qualquer cidade. Neste sentido, o presente artigo surgiu em decorrência de um primeiro artigo publicado sobre análise termodinâmica, onde foi avaliada a eficiência exergética da cidade de Florianópolis em Santa Catarina (HARTMANN; ACEVEDO; BAZZO, 2019).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A principal ferramenta de cálculo para o estudo aqui descrito é o conceito de



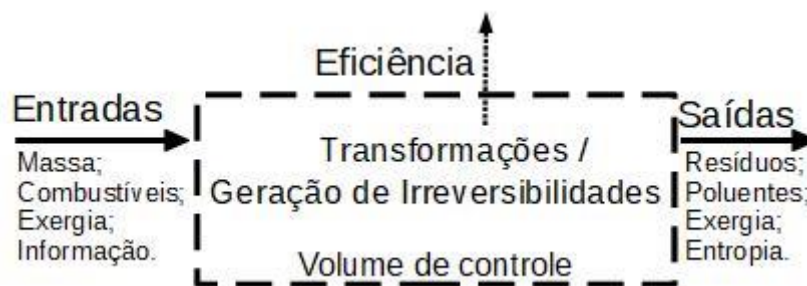


eficiência. A Figura 1 mostra o fluxograma para o cálculo de eficiência conforme uma aproximação do tipo “caixa preta”. Neste tipo de aproximação, se conhecem as entradas e saídas, mas não se observam detalhadamente os processos que ocorrem internamente, por isso se diz que o que ocorre internamente está oculto sob uma caixa preta, opaca. Mas mesmo sem observar os processos internos, é possível calcular a eficiência aplicando o conceito de termodinâmica clássica (ÇENGEL; BOLES, 2013; MORAN *et al.*, 2008; WYLEN; SONNTAG; BORGNACKE, 1994), por meio do quociente entre um efeito desejado e a energia gasta para se obter aquele efeito, conforme a equação (1),

$$\eta = \frac{\text{Efeitodesejado}}{\text{Energia gasta}} \quad (1)$$

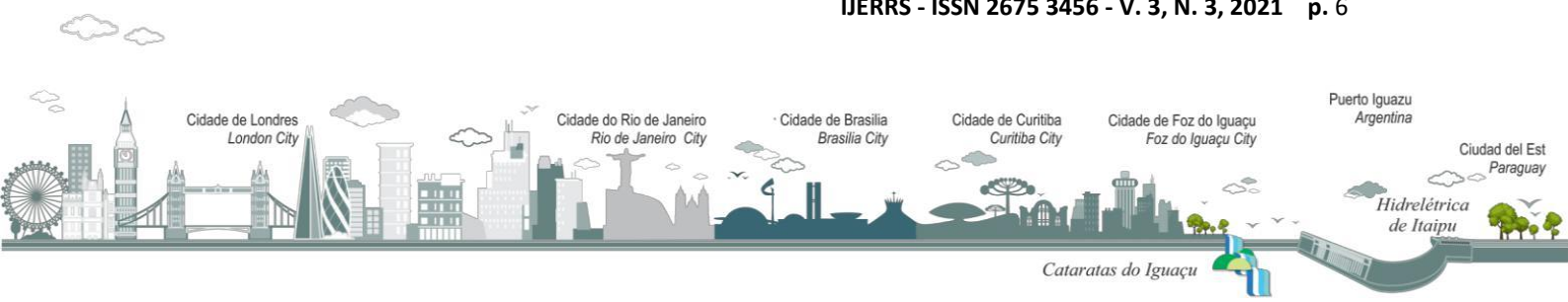
Onde η é a eficiência. A equação (1) pode ser aplicado a qualquer sistema termodinâmico. Para o caso de motores térmicos por exemplo o efeito desejado é o trabalho útil gerado pelo motor e a energia gasta é a energia contida no combustível consumido pelo motor.

Figura 1 – Volume de controle genérico para análise termodinâmica de máquinas e sistemas térmicos.



Fonte: os autores, 2021.

Na Figura 1 é possível observar os principais tipos de entradas e saídas para um volume de controle genérico que representa a modelagem típica para o cálculo de eficiência de máquinas e sistemas térmicos. É importante notar que no interior da figura está indicada a ocorrência de transformações e geração de irreversibilidades. Esta é a característica principal de máquinas e sistemas térmicos. Eles operam através da transformação de



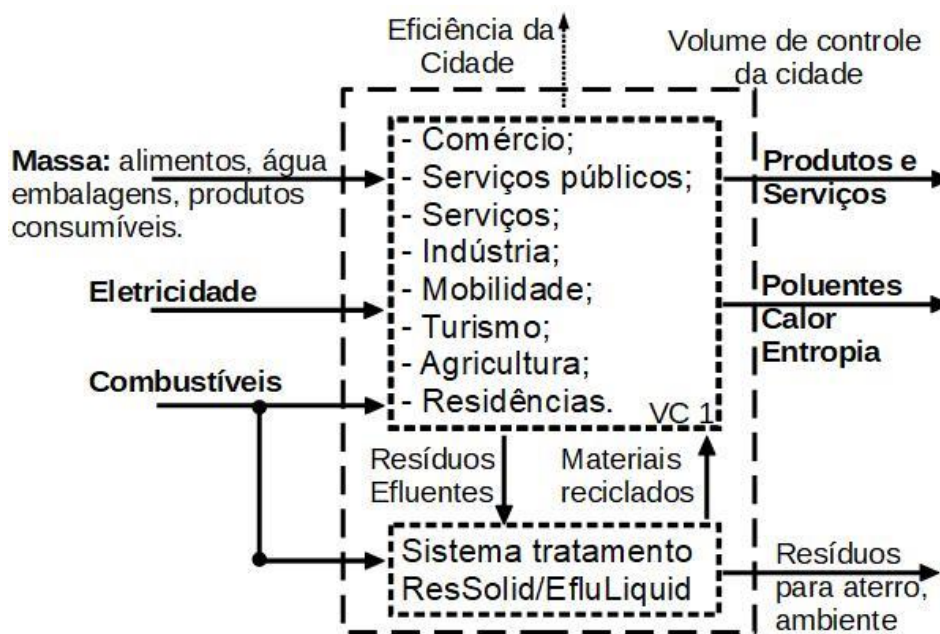


massa e/ou energia, e por conseguinte geram irreversibilidades.

Quando se executa uma análise termodinâmica de cidades o volume de controle aplicado é similar ao mostrado na Figura (1), e a eficiência é calculada utilizando-se também a equação (1). No entanto, quando se trata de cidades deve-se detalhar melhor o volume de controle para se ter uma visão mais ampla sobre os processos que ocorrem no interior das cidades e que influenciam na sua eficiência termodinâmica.

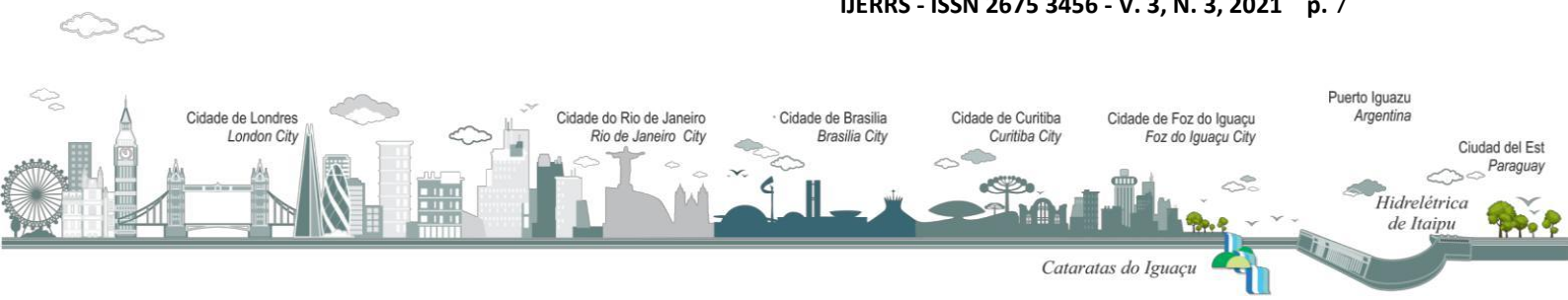
Uma visão detalhada dos processos internos tem a vantagem de poder fornecer análises mais exata do desempenho dos processos dinâmicos das cidades, permitindo assim ações mais eficazes no sentido de aumentar a eficiência das cidades. Serão necessários por isso volumes de controle adicionais, no interior do volume de controle principal que engloba a cidade. A Figura 2 mostra um volume de controle genérico aplicado a análise termodinâmica das cidades.

Figura 2 – Volume de controle genérico para análise termodinâmica de cidades.



Fonte: os autores, 2021.

É possível observar na Figura 2 os principais fluxos de entrada e saída no volume de



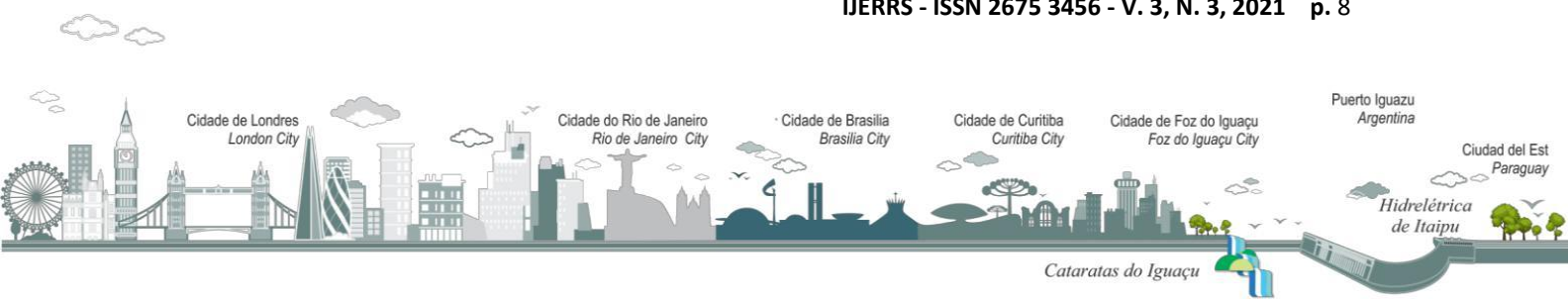


controle da cidade. Dentro deste volume de controle principal há dois volumes de controle adicionais: o volume de controle 1 (VC 1) que abriga outros subsistemas como comércio, indústria, serviços, agricultura, mobilidade, residências etc. e o volume de controle que engloba o sistema de tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos. É no interior do VC 1 que ocorrem os principais processos de transformação de massa/energia e geração de irreversibilidades que influenciam a eficiência termodinâmica da cidade. É importante observar também que os subsistemas dentro do VC 1 podem ser tratados como novos volumes de controle, caso seja necessário detalhar a análise em algum setor específico da cidade.

Observando agora o lado direito da Figura 2 é possível notar a saída de Produtos e Serviço do volume de controle principal, indicando um fluxo de produção da cidade. Com isso, e conhecendo os fluxos de entrada de massa, combustíveis e eletricidade no volume de controle, pode-se calcular a eficiência da cidade utilizando a equação (1).

A grande questão agora é: como mensurar, utilizando parâmetros e propriedades termodinâmicas, a produção das cidades? Seria possível ter um parâmetro termodinâmico universal para quantificar o fluxo de produção de cidades com diferentes características? Por exemplo, como comparar uma cidade industrial que produz automóveis ou têxteis com uma cidade que vive de serviços financeiros ou produção de softwares? Como comparar a eficiência dos dois últimos exemplos com cidades turísticas, que a princípio, não produzem nenhum bem mensurável? A reflexão sobre estas perguntas traz como resposta uma grande dificuldade em se obter uma metodologia de cálculo de eficiência termodinâmica utilizando a equação (1), que seja aplicável a qualquer cidade, independentemente de sua localização geográfica, cultura, população e perfil econômico.

Para se vencer esta dificuldade em se calcular a eficiência das cidades, a solução é aplicar uma análise de 2ª Lei da Termodinâmica para as cidades. Como foi discutido acima, não é possível ter um parâmetro termodinâmico comum para calcular a “utilidade” da produção de qualquer cidade, confirmando o que já havia sido discutido na seção revisão bibliográfica. No entanto, todas as cidades, independentemente de sua localização geográfica, cultura, população e perfil econômico, consomem massa, energia e geram irreversibilidades. Por isso é possível aplicar uma análise de 2ª Lei da Termodinâmica e calcular a sua eficiência exergetica. É necessário agora introduzir a propriedade exergia.





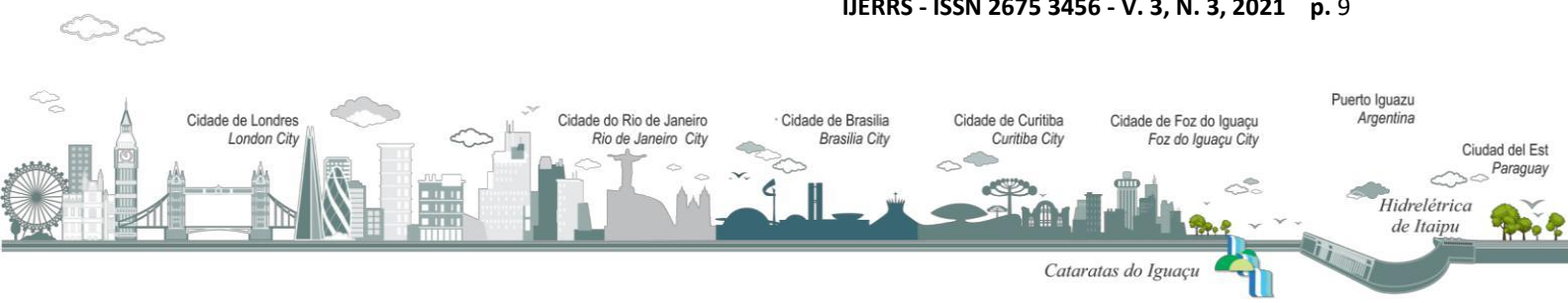
A 1ª Lei da Termodinâmica traz como corolário para sistemas, a propriedade **energia**. Quando se tem um volume de controle com fluxo de massa de entrada e saída a propriedade energia é melhor definida através da propriedade termodinâmica entalpia (H), por isso o balanço energético das cidades é realizado através da propriedade entalpia. É importante saber que a propriedade entalpia indica somente a quantidade de energia relacionada a um fluxo material. A qualidade da energia de um fluxo material é medida através da propriedade entropia (S), que é o corolário da 2ª Lei da Termodinâmica. Por fim, a propriedade exergia (Ψ) é a composição entre as propriedades entalpia, entropia e temperatura. Para maiores informações sobre as propriedades entalpia, entropia e exergia indica-se pesquisa nos livros texto de termodinâmica (ÇENGEL; BOLES, 2013; MORAN *et al.*, 2008; WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1994). A exergia é calculada conforme a equação (2),

$$\psi = H - T_0S \quad (2)$$

Onde o subscrito 0 na temperatura T significa estado de referência, que é o estado termodinâmico com temperatura $T = 298,15 K$ e pressão $p = 1 atm$. O mais importante sobre a propriedade exergia (Ψ) é entender que ela representa a quantidade de energia disponível, ou seja, um indicador de **disponibilidade termodinâmica**, em um determinado estado. Isto porque a entalpia H é subtraída por um fator T_0S , e este último representa o fator de irreversibilidade. Assim, a exergia é uma propriedade termodinâmica abrangente, pois traz em si a informação da quantidade de energia disponível H e de um fator de irreversibilidade T_0S . Por isso, quando se faz uma análise de eficiência exérgica o que se está medindo é o nível de irreversibilidades de um determinado processo ou sistema. Assim, quando comparamos a eficiência exérgica de duas cidades estamos comparando qual delas consegue realizar as suas funções gerando menos irreversibilidades, ou seja, qual delas é mais eficiente.

METODOLOGIA

Para o cálculo de eficiência exérgica das cidades, deve-se ter o valor das taxas de exergia de entrada e taxas de exergia destruída dentro da cidade. Lembrando que taxa é a





variação da energia (ou exergia) por unidade de tempo em Joule/segundo (J/s) ou Watt (W). A eficiência exergética (eficiência de 2ª Lei da Termodinâmica) é calculada conforme a equação (3),

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\dot{\psi}_{Destruida}}{\dot{\psi}_{Entrada}} \quad (3)$$

Onde η_{II} é a eficiência exergética, $\dot{\psi}_{Destruida}$ é a exergia destruída nos processos que ocorrem no interior da cidade e $\dot{\psi}_{Entrada}$ é a exergia que entra no volume de controle da cidade. Como no interior da cidade existem mais de um processo e há mais de um fluxo de entrada de exergia, a equação (3) deve ser escrita em termos de somatório de todos os processos de interesse,

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \dot{\psi}_{Destruida, i}}{\sum_{i=1}^n \dot{\psi}_{Entrada, i}} \quad (4)$$

Onde i representam todos os processos de interesse dentro da cidade (combustíveis, eletricidade etc.). A sequência sugerida para o cálculo da equação (4) é a seguinte: começar pela exergia de entrada $\dot{\psi}_{Entrada}$, deve-se fazer uma tabela com a quantidade de combustíveis e de eletricidade que a cidade consome, começando pelos combustíveis. Lembre-se que os dados de consumo de combustíveis são publicados no site da ANP em volume (m³ ou litros) (OBS: a única exceção é para GLP, onde o consumo está em massa).

Deve-se então multiplicar o consumo em volume (m³) pela densidade (kg/m³) para obter o consumo em massa (kg). Com o consumo em massa é possível obter duas grandezas: i) energia e ii) emissão de CO₂. Para obter a energia deve-se multiplicar a massa consumida de combustível pelo seu PCI (poder calorífico inferior). Para obter a exergia, deve-se multiplicar a energia pelo fator Beta, que será mostrado a seguir. No caso ii), para conseguir o valor de emissões de CO₂ basta multiplicar a massa consumida de combustível pelo fator de emissão do combustível.

A Tabela 1 mostra os dados para o cálculo da exergia de entrada de combustíveis líquidos e gasosos. Note que com os valores de consumo de combustíveis por ano, o valor da taxa de energia será por ano (Joules/ano).

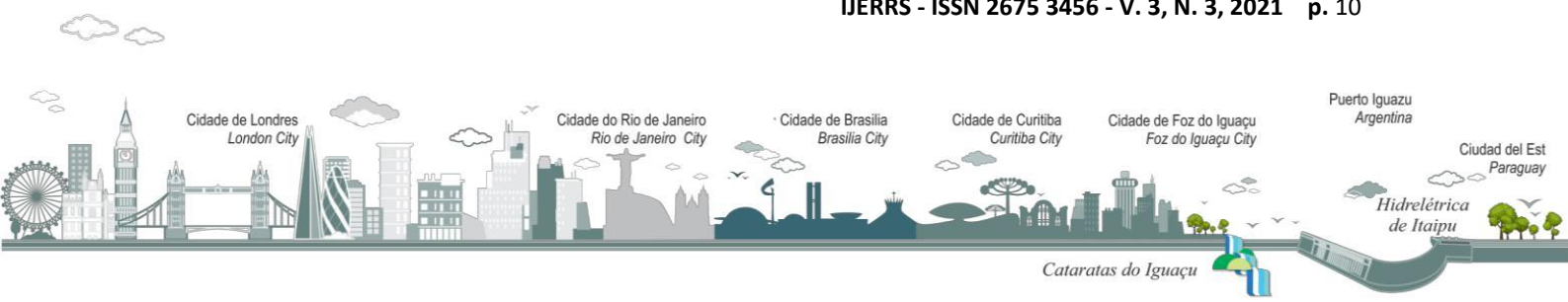




Tabela 1 – Dados para obtenção de energia e exergia.

Combustível	Volume [m ³]	Densidade [kg/m ³]	Massa [kg]	PCI [kJ/kg]	Energia [kJ]	Fator Beta [-]	Exergia [kJ]
Gasolina		750		39000		1,07	
Diesel		840		42000		1,06	
Etanol		810		26000		1,08	
GLP	NA	NA		46000		1,05	
Gás Natural		0,78		37000		1,02	

*NA: não se aplica.

Fonte: os autores, 2021.

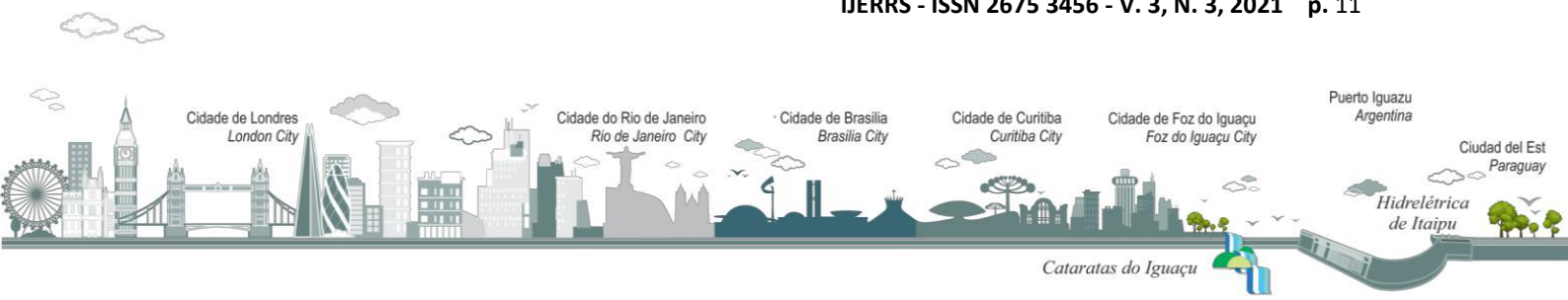
Para o caso da eletricidade o processo é mais simples, pois em termos de definição a exergia de uma corrente elétrica é a própria energia. Assim, $Energia_{Elet} = Exergia_{Elet}$. Deve-se ter cuidado pois no site da ANEEL ou das concessionárias de energia elétrica, o consumo é dado em unidade de kWh e não J ou kJ. O fator de conversão é: 1 kWh = 3600 kJ ou 1 kWh = 3,6 MJ. A Tabela 2 mostra como o fluxo de entrada de exergia fica,

Tabela 2 – Dados para obtenção de energia e exergia, com eletricidade.

Combustível	Volume [m ³]	Densidade [kg/m ³]	Massa [kg]	PCI [kJ/kg]	Energia [kJ]	Fator Alfa [-]	Exergia [kJ]	
Gasolina		750		39000		1,07		
Diesel		840		42000		1,06		
Etanol		810		26000		1,08		
GLP	NA	NA		46000		1,05		
Gás Natural		0,78		37000		1,02		
Eletricidade	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
TOTAL								

Fonte: os autores, 2021.

Para o cálculo de exergia destruída deve-se conhecer a eficiência de cada processo. Para cidades de clima quente, a eficiência para utilização de eletricidade é baixa, cerca de 11,5%. Isto porque em cidades quentes a utilização de condicionadores de ar e refrigeradores é





grande e a eficiência exergética destes é muito baixa (1,9% para condicionadores de ar). Para cidades frias a eficiência exergética na utilização de eletricidade é maior (25%). Para veículos com motores a combustão a eficiência exergética é de aproximadamente 25% e para veículos com motores elétricos, cerca de 76%. A Tabela 3 resume os valores de eficiência exergética dos principais processos termodinâmicos que acontecem nas cidades.

Tabela 3 – Eficiência exergética de alguns processos de interesse nas cidades.

Processo	Eficiência exergética (η_{II})
Motores a combustão	25%
Motores elétricos	76%
Consumo de eletricidade (doméstico e comercial)	11,5%
Fornos a GLP ou gás natural	14,9%

Fonte: os autores, 2021.

A exergia destruída é calculada então aplicando-se os valores de eficiência exergética de cada processo, através da equação (5),

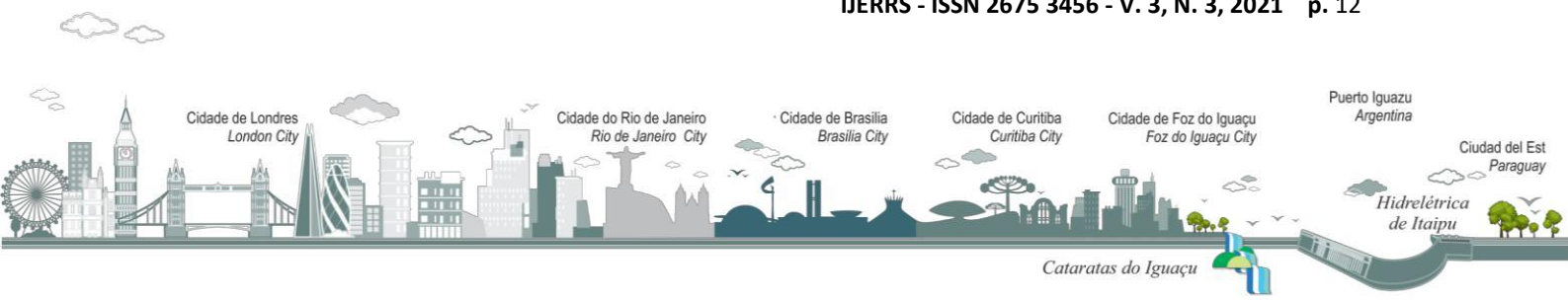
$$\dot{\psi}_{Destruida,j} = (\dot{\psi}_{Entrada,j}) \cdot (100 - \eta_{II,j}) \quad (5)$$

Onde j representa um processo qualquer na cidade sob análise. A tabela de exergia destruída, apoiando-se no fluxo exergético de entrada (Tabela 2), ficaria com o formato da Tabela 4.

Tabela 4 – Dados para obtenção de exergia destruída.

Combustível	Exergia de entrada [GJ]	Eficiência exergética (η_{II})	Exergia destruída [GJ]
Gasolina	(calculada na Tabela 2)	25%	Equação (5)
Diesel	(calculada na Tabela 2)	25%	Equação (5)
Etanol	(calculada na Tabela 2)	25%	Equação (5)
GLP	(calculada na Tabela 2)	14,9%	Equação (5)
Gás Natural	(calculada na Tabela 2)	14,9% ou 25%	Equação (5)
Eletricidade	(calculada na Tabela 2)	11.5%	Equação (5)
TOTAL		TOTAL	

Fonte: os autores, 2021.





Nota-se que os valores de eficiência para gasolina, óleo Diesel e etanol são os mesmos, pois, esta eficiência é a eficiência dos motores a combustão. Para GLP utilizou-se a eficiência de fornos, pois o GLP é utilizado, pelo menos no Brasil, somente para cocção. Para o gás natural pode-se ter cocção ou aplicação veicular, faz-se então uma média. E para a eletricidade deve-se utilizar a média da eficiência exergética para cidades quentes (caso da maioria na América Latina). Em caso de transporte urbano com ônibus ou trem elétrico a eficiência exergética da utilização da eletricidade aumenta.

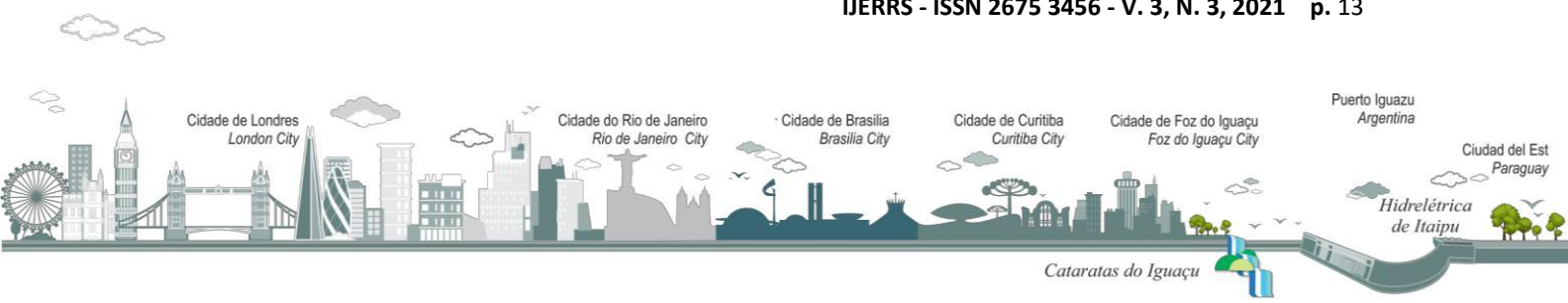
Ao final, para o cálculo da eficiência exergética das cidades basta computar o total das colunas Exergia de entrada e Exergia destruída na Tabela 4 e substituir na equação 4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia descrita acima foi apresentada aos alunos de graduação na disciplina optativa Termodinâmica das Cidades do curso de engenharia de energia da UNILA (Universidade Federal de Integração Latino-Americana) durante o semestre letivo entre março e julho de 2021. Como resultado, foram apresentados seminários com avaliação termodinâmica de algumas cidades da América Latina, sendo então selecionados os cinco melhores artigos para publicação. Os resultados obtidos foram os seguintes: Buenos Aires/Argentina eficiência exergética de 14,9%, Cidade do México/México eficiência exergética de 22,16%, Lima/Peru eficiência exergética de 20,9%, Recife/Brasil eficiência exergética de 22,58%, Santos/Brasil eficiência exergética de 19,70%.

Os resultados apresentados nos trabalhos dos alunos de graduação na disciplina optativa de Termodinâmica das Cidades sugerem novos espaços de pesquisa tanto em relação a metodologia para quantificar a eficiência exergética das cidades quanto no desenvolvimento de novas tecnologias para mitigar o consumo de energia e diminuir a irreversibilidades decorrentes das perdas e dissipação de energia.

Vale, a partir dos resultados, pontuar algumas reflexões. Que significado terá para um analista atento, saber que Buenos Aires tem uma eficiência exergética de 14,9%? Ou, que significado terá para Recife/Brasil, cuja eficiência exergética é 22,58%? Que considerações podem ser feitas?





As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de eficiência exergética, onde a eletricidade, o GLP e gás natural têm os menores valores e são muito fortemente utilizados no consumo residencial e de serviços (ar-condicionado, eletrodomésticos, fogões) próprio de cidades de serviços, de turismo, residencial. Já a gasolina, Óleo Diesel e etanol têm maiores eficiência exergética e são normalmente utilizados na motorização de sistemas de transformação, em ambientes com predominância industrial.

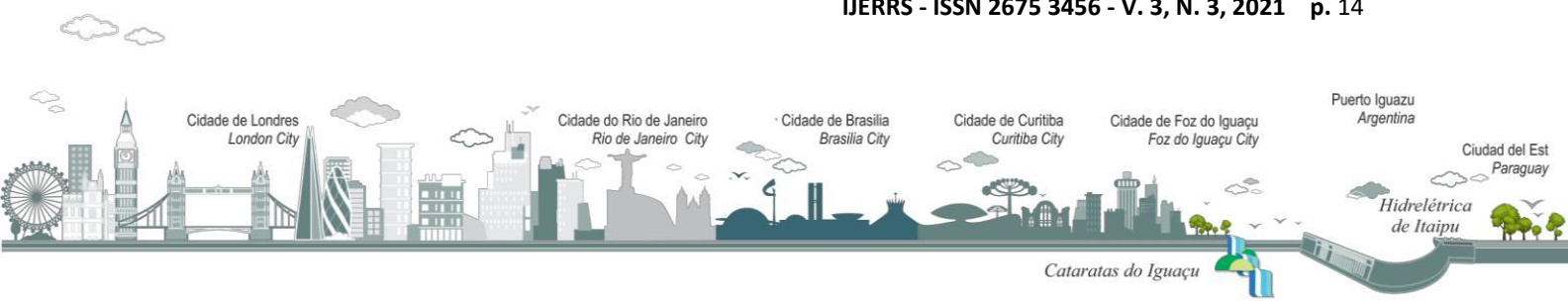
Para cidades como Buenos Aires os resultados indicam que a melhoria da eficiência exergética demandam maiores investimentos em novas tecnologias, como: projetos das edificações residenciais e de serviço, materiais de construção civil, fachadas, coberturas, urbanismo, a arborização, planejamento urbano em geral etc. Além disso, os ambientes de armazenamento de produtos refrigerados e cocção necessitam de novos paradigmas para aumentar a eficiência exergética. Da mesma forma, é requerido investimento em pesquisa científica e industrial para aumentar ainda mais a eficiência exergética de cidades com as características de Buenos Aires, Cidade do México, Lima Recife, e Santos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados no seminário de graduação sobre Termodinâmica das Cidades do curso de engenharia de energia da UNILA durante o semestre letivo entre março e julho de 2021 mostraram a aplicabilidade geral da metodologia aqui apresentada. Os trabalhos são resultados tangíveis da aplicação da metodologia. Mas tão importante quanto, foram os resultados intangíveis que propiciaram aos alunos percepções sobre a cidade, sob o ponto de vista da energia que movimenta a cidade. Os detalhes das análises de cada cidade serão mostrados nos demais artigos que compõe esta mesma edição.

REFERÊNCIAS

ALBINO, V.; BERARDI, U.; DANGELICO, R. M. Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. **Journal of Urban Technology**, v. 22, n. 1, p. 3–21, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>





ALMASRI, R. A. *et al.* Exergy and Economic Analysis of Energy Consumption in the Residential Sector of the Qassim Region in the Kingdom of Saudi Arabia. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 2606, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12072606>

BENEVOLO, L. **The history of the city**. Cambridge: MIT Press, 1980.

BRISTOW, D.; KENNEDY, C. Why Do Cities Grow? Insights from Nonequilibrium Thermodynamics at the Urban and Global Scales. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 2, p. 211–221, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12239>.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: McGrawHill Bookmann, 2013.

EGER, J. M. Smart Growth, Smart Cities, and the Crisis at the Pump A Worldwide Phenomenon. **I-WAYS, Digest of Electronic Commerce Policy and Regulation**, v. 32, n. 1, p. 47–53, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3233/iwa-2009-0164>

GLAESER, E. **Triumph of the city: How our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier and happier**. New York: Penguin, 2011.

GOODALL, B. **The Penguin Dictionary of Human Geography**. London: Penguin, 1987. *E-book*.

HARTMANN, R. M.; ACEVEDO, L. E. G.; BAZZO, E. Assessment of municipal solid waste management system using a mixing index as indicative for urban sustainability analysis. *In*: Proceedings of ECOS 2019 - The 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 32., 2019. Wroclaw. **Anais...** Wroclaw: University of Science and Technology, 2019. p. 1715–1729.

KHAN, I.; KABIR, Z. Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment. **Renewable Energy**, v. 150, p. 320–333, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.132>

KRUGMAN, P. On the number and location of cities. **European Economic Review**, v. 37, n. 2–3, p. 293–298, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0014-2921\(93\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0014-2921(93)90017-5)

MALINAUSKAITE, J. *et al.* Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. **Energy**, v. 141, p. 2013–2044, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.11.128>.

MORAN, M. J. *et al.* **Fundamentals of engineering thermodynamics**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

NELLES, M.; GRÜNES, J.; MORSCHECK, G. Waste Management in Germany – Development to a Sustainable Circular Economy? **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 6–14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2016.07.001>.

PELOROSSO, R; GOBATTONI, F; LEONE, A. The low-entropy city: A thermodynamic approach to reconnect urban systems with nature. **Landspace and Urban Planning**, v. 168, p. 22–30, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.002>.

PURVIS, B.; MAO, Y. Thermodynamic Entropy as an Indicator for Urban Sustainability? **Procedia Engineering**, v. 198, p. 802–812, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.07.131>.

SUSANTI, R. *et al.* Smart Growth, Smart City and Density: In Search of The Appropriate Indicator for Residential Density in Indonesia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 227, p. 194–201, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.062>

THURSTON, R. H. **A History of the Growth of the Steam-Engine**. New York: Appleton and Company, 1886.

