

Lógica Fuzzy Aplicada ao Estudo da Demanda Energética: Uma Análise do Estado da Arte

Gérson S. Nunes^{1,4}, Graçaliz P. Dimuro², Giancarlo Lucca², Hélida S. Santos²,
Viviane L. D. Mattos³, Tiago C. Asmus³

¹Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional – Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – CEP: 96203-900 – Rio Grande – RS – Brasil

²Centro de Ciências Computacionais – Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – CEP: 96203-900 – Rio Grande – RS – Brasil

³Instituto de Matemática, Estatística e Física – Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – CEP: 96203-900 – Rio Grande – RS – Brasil

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – CEP: 96201-460 – Rio Grande – RS – Brasil

{gerson.sn85, vivianeldm.furg, tiagoasmus}@gmail.com, {gracalizdimuro, giancarlo.lucca, helida}@furg.br

Abstract. *With the increasing electricity demand in Brazil, studies are necessary to help make the best use of this resource, avoiding losses and waste. Among the methodologies used, machine learning has been growing recently, highlighting the use of controllers by fuzzy logic. Thus, this work aims to carry out a bibliographic survey on the state of the art, to on the Web of Science platform, analyze three scenarios with the following queries: energy, consumption, fuzzy and logic; energy, demand and fuzzy; energy, consumption and fuzzy. Therefore, this work presents a perspective on the number of citations and the increase in the number of studies that relate the use of fuzzy logic with the cited queries.*

Resumo. *Com a crescente demanda por energia elétrica no Brasil, faz-se necessário estudos que auxiliem no melhor uso deste recurso, evitando perdas e desperdícios. Dentre as metodologias utilizadas, a aprendizagem de máquina vem crescendo, destacando a utilização de controladores por lógica fuzzy. Assim, este trabalho visa realizar uma sondagem bibliográfica sobre o estado da arte, na plataforma Web of Science, analisando três cenários com as seguintes queries: energy, consumption, fuzzy e logic; energy, demand e fuzzy; energy, consumption e fuzzy. Portanto, este trabalho apresenta uma perspectiva sobre o número de citações e o aumento do número de estudos que relacionam o uso de lógica fuzzy, com as queries citadas.*

1. Introdução

O crescimento econômico de uma cidade, região ou país, está diretamente ligado à disponibilidade dos recursos envolvidos nos processos produtivos, dentre eles destacando-se a mão de obra, o capital, a matéria prima e a energia. Porém, visando um desenvolvimento sustentável em determinada região, é preciso que exista um planejamento de como o fornecimento desses insumos será feito no médio e longo prazo, para que não ocorram excessos ou faltas [Ferreira Neto et. al. 2016].

O Brasil, assim como outros países em desenvolvimento, passa por um momento de aumento na demanda por energia, seja proveniente de derivados do petróleo, gás natural e biocombustíveis, entre outras, mas principalmente a energia elétrica.

De acordo com EPE (2023), entre os anos de 2021 e 2022, houve um aumento de 3,3% na geração de energia elétrica no Brasil. Na Figura 1, podemos visualizar a evolução da demanda de energia elétrica anual, em GWh (Gigawatt-Hora), com pequenas oscilações em momentos de crises que afetaram a economia, assim como outros setores.

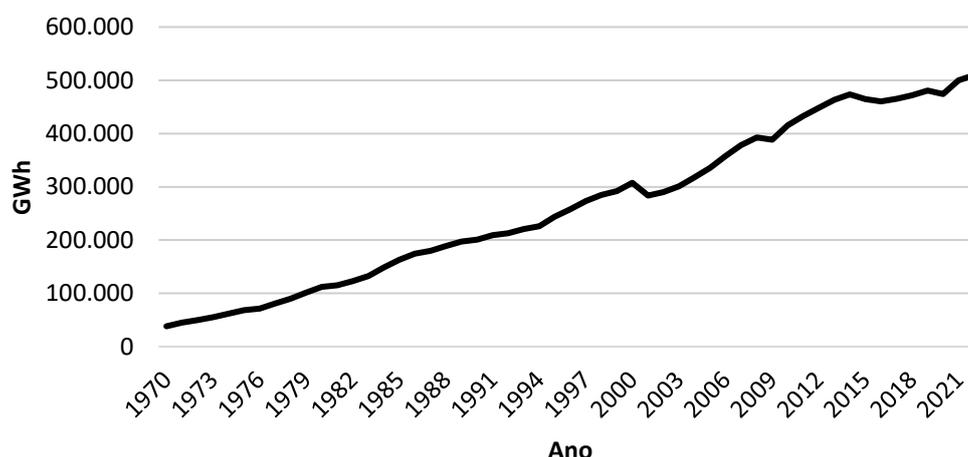


Figura 1. Evolução da demanda de energia elétrica no Brasil, elaborado de IPEA (2023).

Como as fontes e os tipos de energia aplicadas nos processos produtivos, moradia ou lazer são distintos, um sistema de gerenciamento faz-se cada vez mais necessário, visando melhorar a alocação destes recursos e uma utilização otimizada, evitando desperdícios e garantindo uma alta eficiência e confiabilidade do sistema. Assim, segundo Zhang et.al. (2021), podemos destacar a aplicação de modelos de aprendizagem de máquina para reduzir as incertezas, auxiliando neste processo de controle, no caso em questão, em edifícios. O trabalho de Rezk et. al. (2021), destaca o baixo custo computacional e facilidade de realização *online* de estratégias de operação de sistemas de energia híbridos, analisando a distribuição do fluxo de potência entre três elementos de potência diferentes. Igualmente, o estudo de Murty e Kumar (2020), propuseram um sistema de inferência *Fuzzy* para o gerenciamento da carga e descarga do sistema de armazenamento de energia integrada a microrredes, conectada a fontes de energia híbridas, como fotovoltaica, turbinas eólicas, gerador diesel, microturbinas eólicas e células de combustível.

Cabe salientar, que durante a realização da disciplina de Computação Difusa e Intervalar, do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), uma introdução ao estudo de Lógica e Sistemas *Fuzzy* foi apresentado, motivando a realização de uma análise mais aprofundada sobre o estado da arte da interação entre esses dois temas. Pois, de acordo com Zadeh (1965), a lógica *fuzzy* é um instrumento extremamente eficaz no tratamento de dados incertos para a obtenção de resultados precisos. Incertezas essas, que podem ser recorrentes em qualquer análise de demanda energética.

Motivado pela discussão acima, este trabalho tem como objetivo realizar uma pesquisa sobre o estado da arte em controladores *fuzzy* aplicados ao gerenciamento da demanda de energia.

Desta forma, o presente trabalho está organizado da seguinte maneira: na Seção 1, tem-se a introdução; na sequência vem a Seção 2, que apresenta a fundamentação teórica, partindo da lógica *fuzzy* e onde alguns dos trabalhos relacionados são discutidos. Na Seção 3, a metodologia é apresentada, bem como a maneira como foi realizada a pesquisa. Em seguida, na Seção 4, os resultados obtidos são apresentados e analisados. Por fim, na Seção 5, as conclusões são apresentadas e possibilidades de estudos futuros são comentados.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção aborda os principais conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1. Lógica *Fuzzy*

Dado um conjunto “*U*”, e “*A*” um subconjunto de “*U*”. A função característica de “*A*” é dada por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A, \\ 0, & \text{se } x \notin A. \end{cases} \quad (1)$$

Desta forma, μ_A é uma função cujo domínio é “*U*” e a imagem está contida no conjunto $\{0, 1\}$, com $\mu_A(x) = 1$ indicando que o elemento *x* está em “*A*”, enquanto $\mu_A(x) = 0$ indica que *x* não é elemento de “*A*”. Assim, a função característica descreve completamente o conjunto “*A*” já que tal função indica quais elementos do conjunto universo “*U*” são elementos também de “*A*”. Entretanto, existem casos em que a pertinência entre elementos e conjuntos não é precisa.

Assim, pode-se dizer que a lógica *fuzzy* foi desenvolvida para contrapor a teoria clássica, onde um elemento pode pertencer ou não a um conjunto, com fronteira bem definida. No contexto da lógica *fuzzy*, um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto, através dos graus de pertinência destes mesmos elementos aos conjuntos. Os graus de pertinência podem assumir valores entre 0 e 1, onde 0 indica a exclusão absoluta do elemento ao conjunto, 1 indica a total pertinência do elemento ao conjunto, e os demais valores apontam para uma pertinência parcial do elemento ao conjunto. Desta forma, aumenta-se a capacidade de expressão da função característica [Barros e Bassanezi, 2006].

Um número *fuzzy* triangular é um bom exemplo para comparar com a função característica descrita na Equação 1. Assim, um número *fuzzy* é dito triangular se sua função de pertinência for:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{u-a}, & \text{se } a < x \leq u, \\ \frac{b-x}{b-u}, & \text{se } u < x \leq b, \\ 0, & \text{se } x > b. \end{cases} \quad (2)$$

Onde “ u ” representa o valor modal, “ a ” e “ b ” são os extremos do intervalo, aberto, sobre o qual “ μ_A ” possui valores não nulos.

2.2. Trabalhos Relacionados

A seguir, apontamos alguns trabalhos relevantes onde a lógica *fuzzy* é utilizada para auxiliar processos de controle da demanda de energia.

O trabalho de [Cremasco, 2008], utilizou um controlador *fuzzy* para realizar uma avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa e reativa em uma empresa do ramo da avicultura de postura, na região de Bastos, São Paulo. Para isto, coletaram-se dados sobre o comportamento dos parâmetros elétricos, como o fator de potência, fator de carga, demanda e consumo ativo.

No estudo de [Mohammad et. al., 2020], foi apresentado um modelo de escalonamento baseado em lógica *fuzzy* para lidar com múltiplas incertezas no escalonamento ótimo dos sistemas integrados eólicos com *Multi-Energy Systems* (MES). O conceito de hub de energia é um método apropriado para modelagem de MES. No entanto, a existência de vários parâmetros técnicos, econômicos, ambientais e sociais no problema de tomada da melhor decisão leva à introdução de incerteza no escalonamento. Assim, foi abordada em uma estrutura de otimização baseada em lógica *fuzzy*.

No artigo de [Mamun et. al., 2020], os autores realizaram uma revisão do estado da arte das tecnologias de previsão de demanda de energia elétrica, apresentando trabalhos recentes relativos à combinação de diferentes algoritmos de aprendizagem de máquina em dois ou mais métodos para a construção de modelos híbridos. Um estudo abrangente sobre cada modelo de previsão único e múltiplo, realizando uma análise aprofundada de suas vantagens, desvantagens e funções. Uma comparação entre seus desempenhos em termos de valores do erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro percentual médio absoluto (MAPE) foi desenvolvida visando auxiliar os pesquisadores na seleção de modelos adequados para previsão de demanda de energia elétrica. Os autores concluíram que o uso de dois ou mais modelos de previsão tem sido utilizado na literatura, para construir modelos híbridos com a melhor precisão, destacando os *Support Vector Machine* (SVM) e Redes Neurais Artificiais (RNA), neste último, havia um bom número de modelos que utilizavam a lógica *fuzzy*.

Um ponto de vista diferente para o estudo do gerenciamento de energia em microrredes foi apresentado por [Mansouri et. al., 2021], pois além dos objetivos econômicos, os autores mencionam a importância que os operadores de microrredes têm dado a outros objetivos, tais como reduzir o impacto ambiental, reduzir perdas, modificar

a curva da procura do consumidor, e assim por diante. Assim, os autores propuseram uma nova estrutura para abordar simultaneamente as funções objetivo mencionadas em uma estrutura multiobjetivo, conhecido como integração do *home energy management system* (HEMS).

Já no trabalho de [Zhang et.al., 2021], os autores realizaram uma revisão bibliográfica sobre o tópico de previsão de carga em edifícios, com técnicas de aprendizado de máquina. A metodologia utilizada foi a *Sub-keyword Synonym Searching* (SSS), revisando a metodologia, os algoritmos e a precisão destes métodos estudados. O total de artigos pesquisados foi de 105 palavras-chave multiplicado por 10 artigos por palavras-chave, totalizando 1.050 artigos, mas, descontando os artigos duplicados na busca, o número final de artigos foi 702. Ao final do estudo, os autores acharam nove tipos principais de algoritmos de aprendizado de máquina usados para criar carga predição. São eles: (1) Regressão Linear, (2) *Support Vector Machine* (SVM), (3) Rede Neural (NN), (4) *Deep Learning*, (5) Algoritmos baseados em árvore, (6) Híbrido, (7) Métodos Autorregressivos, (8) Modelo *fuzzy* de séries temporais, e (9) Outros.

O estudo de [Rezk et. al., 2021], apresentou uma comparação abrangente de várias estratégias de gerenciamento de energia de sistemas de armazenamento de célula de combustível/supercapacitor/bateria. Essas estratégias são utilizadas para gerenciar a resposta de demanda de energia de sistemas híbridos, de forma otimizada, sob condição de carga altamente flutuante. Duas novas estratégias baseadas no algoritmo de *Salp Swarm* (SSA) e *Mine-blast Optimization* (MO) são propostas. Os resultados dessas estratégias são comparados com estratégias comumente usadas, como controle de lógica *fuzzy*, controle integral proporcional clássico, máquina de estado, minimização de consumo de combustível equivalente, maximização, maximização de energia externa e minimização de consumo equivalente. Combustível de hidrogênio, economia e eficiência geral são usadas para a comparação dessas diferentes estratégias.

O trabalho de [Eckert et. al., 2022], apresenta um procedimento de otimização abrangente de um trem de força e controle de um veículo híbrido elétrico-hidráulico por meio do método de algoritmo genético de peso adaptativo iterativo, utilizando um controlador de lógica *fuzzy*. Visando a máxima otimização da autonomia e a vida útil da bateria, minimizando o peso do sistema de armazenamento de energia a bordo. Neste contexto, foram otimizadas as variáveis de projeto do conjunto de transmissão hidráulica e do sistema elétrico. As melhores configurações foram comparadas com um veículo elétrico otimizado, também movido por um sistema híbrido de armazenamento de energia bateria-ultracapacitor, obtendo uma redução de até 9,57% na relação entre custo do trem de força e autonomia.

3. Metodologia

Esta seção apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, que se baseou no processo de pesquisa na plataforma “*Web of Science*”¹, da editora Clarivate.

¹ Disponível em: <https://www.webofscience.com>

O acesso ocorreu nos computadores da Biblioteca Central da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Foram utilizados, diferentes combinações de palavras-chave para a pesquisa, com a utilização da função AND, que pressupõe que o algoritmo de pesquisa necessita encontrar todas as palavras utilizadas. Foram pesquisados três cenários, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Cenários de pesquisa e as palavras-chave utilizadas

Cenário	Palavras-Chave
1	energy AND consumption AND <i>fuzzy</i> AND logic
2	energy AND demand AND <i>fuzzy</i>
3	energy AND consumption AND <i>fuzzy</i>

Para a escolha destes cenários, foi testada algumas combinações de palavras diretamente relacionadas sobre o assunto, e escolhidos os que apresentavam maior número de artigos. Cabe salientar a proximidade das *queries* escolhidas nos cenários 1 e 3, a palavra *logic* foi retirada, pois foi notado que em alguns artigos, a palavra *Fuzzy* aparece sozinha ou com outras palavras acompanhando.

Nos artigos selecionados, foi realizada uma filtragem, mantendo apenas os que tinham como enfoque a análise, eficiência, consumo e/ou demanda de energia elétrica utilizando lógica *fuzzy*. Além disso, foram retirados os estudos que não possuíam este vínculo e os repetidos. Examinaram-se artigos publicados de 2020 até 2023, conferindo a importância para o estado da arte, através do número de citações.

4. Resultados

Essa seção apresenta os resultados obtidos na busca. Para isso são considerados os três diferentes cenários apresentados anteriormente. Tem-se:

- Cenário 1: 6 artigos, após o refinamento, ficaram 3 artigos;
- Cenário 2: 49 artigos, após o refinamento, ficaram 37 artigos;
- Cenário 3: 18 artigos, após o refinamento, ficaram 10 artigos.

Na fase de refinamento, foram retirados os artigos repetidos ou que não eram foco do estudo, totalizando 50. Dentre estes, considerando apenas as citações por ano, tem-se:

- 2020 - 186 citações;
- 2021 - 850 citações;
- 2022 - 1443 citações;
- 2023 - 708 citações.

Assim, foram encontradas um total de 3187 citações.

Na Figura 2, é possível ver o número de citações dos 50 artigos selecionados, no período de 2020 à 2023. Pode-se notar o aumento no número de citações ao longo dos anos, sugerindo o aumento no número de pesquisas na área. Podemos destacar que em 2023, já atingiu aproximadamente metade da quantidade de citações do ano de 2022, mostrando uma tendência de, no mínimo, igualar-se ao ano anterior.

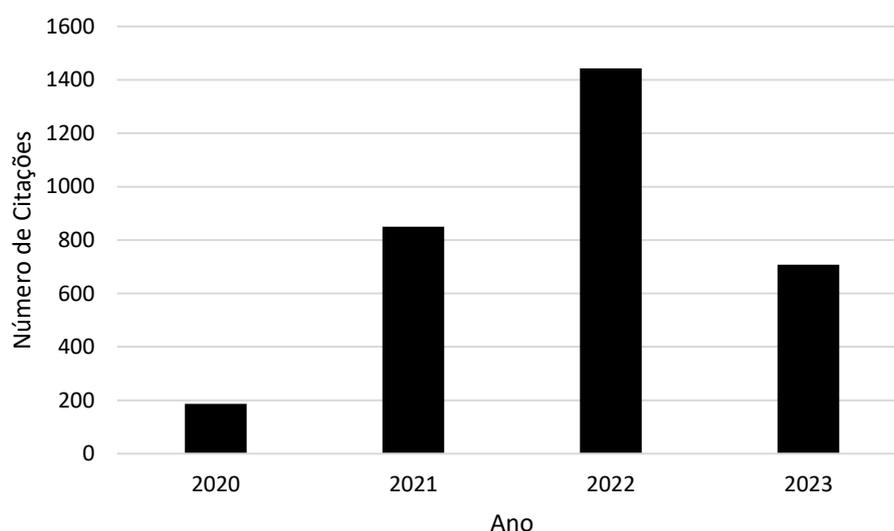


Figura 2. Quantidade de citações dos artigos selecionados na busca na Web of Science, 2020-2023.

Assim, é possível verificar uma crescente quantidade de citações neste ramo de pesquisa, mostrando a importância do uso da aprendizagem de máquina, no caso a lógica *fuzzy*, no estudo da eficiência, consumo e/ou demanda de energia elétrica em diferentes situações.

Na Tabela 2, pode-se observar os principais artigos de cada cenário estudado, e sua contribuição na quantidade de citações e sua importância no estudo.

Tabela 2. Relação dos três artigos mais citados por cada cenário.

Cenário 1	Citações	Cenário 2	Citações	Cenário 3	Citações
[Zhang et. al., 2021]	137	[Wang et. al., 2020]	369	[Tirkolae et. al., 2020]	108
[Rezk et. al., 2021]	75	[Murty e Kumar, 2020]	177	[Zhao et. al., 2022]	50
[Eckert et. al., 2022]	26	[Mansouri et. al., 2021]	86	[Zhu et. al., 2021]	50

5. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma perspectiva sobre o aumento no número de citações e, conseqüentemente, no número de estudos que relacionam o uso de lógica *fuzzy*, com a análise, eficiência, consumo e/ou demanda de energia elétrica. Como foi evidenciada a relevância dos tópicos abordados, além de sua ampla aplicação na área de gestão de matrizes energéticas, é imediata a motivação para o desenvolvimento de trabalhos futuros nas áreas citadas. Em particular, sugere-se o desenvolvimento de estudos focados no gerenciamento de energia elétrica na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), utilizando lógica *fuzzy*. Outra possibilidade está no desenvolvimento destes estudos em matrizes energéticas maiores, como na cidade de Rio Grande, ou em alguma outra cidade localizada no estado do Rio Grande do Sul, ou até mesmo no estado como um todo.

Referências

- Barros, L. C.; Bassanezi, R. C. (2006). Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática. UNICAMP/IMECC, Campinas.
- Cremasco, P. C. (2008). Aplicação da Lógica Fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101828>>.
- Eckert, J. J., Barbosa, T. P., Da Silva, S. F., Silva, F. L., Silva, L. C. A.; Dedini, F. G. (2022). Electric Hydraulic Hybrid Vehicle Powertrain Design And Optimization-Based Power Distribution Control To Extend Driving Range And Battery Life Cycle. Energy Conversion and Management.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. Anuário estatístico de energia elétrica 2023 ano base 2022. Ministério de Minas e energia, 2023. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#Apresenta%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: set. de 2023.
- Ferreira Neto, A. B.; Correa, W. L. R.; Perobelli, F. S. (2016). Consumo de Energia e Crescimento Econômico: uma Análise do Brasil no período 1970-2009. Análise Econômica, Porto Alegre, 65: 181-204.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, IPEA. *Macroeconômico*, 2023. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: fev. de 2023.
- Lv, Z.; Song, H. (2021). Trust Mechanism of Feedback Trust Weight in Multimedia Network. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications.
- Mamun, A. A., Sohel, M., Mohammad, N., Haque Sunny, M., Dipta, D., Hossain, E., (2020). "A Comprehensive Review of the Load Forecasting Techniques Using Single and Hybrid Predictive Models", in IEEE Access, vol. 8, pp. 134911-134939, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010702.
- Mansouri, S. A., Ahmarinejad, A., Nematbakhsh, E., Javadi, M. S., Jordehi, A. R., Catalão, J. P.S., (2021). Energy management in microgrids including smart homes: A

- multi-objective approach. *Sustainable Cities and Society*. ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102852>.
- Mohammad, M.; Younes, N.; Behnam, M. (2020). Fuzzy-based scheduling of wind integrated multi-energy systems under multiple uncertainties, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100602>.
- Murty, V.V.S.N., Kumar, A., (2020). RETRACTED ARTICLE: Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems. *Prot Control Mod Power Syst*. <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0147-z>.
- Rezk, H., Nassef, A. M., Abdelkareem, M. A., Alami, A. H., Fathy, A. (2021). Comparison Among Various Energy Management Strategies For Reducing Hydrogen Consumption in a Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor/Battery System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46: 6110-6126.
- Tirkolaee, E. B., Goli, A., Weber, G. W., (2020). "Fuzzy Mathematical Programming and Self-Adaptive Artificial Fish Swarm Algorithm for Just-in-Time Energy-Aware Flow Shop Scheduling Problem With Outsourcing Option," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28, 11, 2772-2783.
- Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., Chen, Z., (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110015>.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. In *fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A Zadeh*, pages 394–432. World Scientific.
- Zhang, L.; Wen, J.; Li, Y.; Chen, J.; Ye, Y.; Fu, Y.; Livingood, W. (2021). *A Review of Machine Learning in Building Load Prediction*. Elsevier, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921000209>. Acesso em: jul. de 2023.
- Zhao, L., Chau, K. Y., Tran, T. K., Sadiq, M., Xuyen, N. T. M., Phan, T. T. H., (2022). Enhancing green economic recovery through green bonds financing and energy efficiency Investments. *Economic Analysis and Policy*. ISSN 0313-5926, <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.08.019>.
- Zhu, L., Luo, J., Dong, Q., Zhao, Y., Wang, Y., Wang, Y., (2021). Green technology innovation efficiency of energy-intensive industries in China from the perspective of shared resources: Dynamic change and improvement path. *Technological Forecasting and Social Change*. ISSN 0040-1625. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120890>.