

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento

THIAGO PERES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PREDIÇÃO DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM TERMOELÉTRICA À BIOMASSA**

Tupã-SP

2023

THIAGO PERES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PREDIÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM TERMOELÉTRICA À BIOMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Tupã, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agronegócio e Desenvolvimento.

Área de concentração: Agronegócio e Desenvolvimento

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Co-orientadores: Prof. Dr. Sergio Silva Braga Junior; Profa. Dra. Rebeca Delatore Simões

Tupã-SP

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Biblioteca e Documentação da FCE – Unesp, Câmpus Tupã:

O48m	Oliveira, Thiago Peres de . Modelagem matemática para predição da geração de energia elétrica em termoelétrica à biomassa. / Thiago Peres de Oliveira. – Tupã: [s.n.], 2023. 55 f. : il. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento) –Universidade Estadual Paulista UNESP – Faculdade de Ciências e Engenharia, 2023. Orientador: Luis Roberto Almeida Gabriel Filho Coorientador: Sérgio Silva Braga Junior Coorientadora: Rebeca Delatore Simões 1. Geração de Energia Elétrica. 2. Eficiência Energética. 3. Inteligência artificial. I. Título. II. Autor.
------	---

Fonte: Eliana Kátia Pupim, bibliotecária CRB 8 – 6202. Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PREDIÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TERMOELÉTRICA À BIOMASSA

AUTOR: THIAGO PERES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

COORIENTADOR: SERGIO SILVA BRAGA JUNIOR

COORIENTADORA: REBECA DELATORE SIMÕES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronegócio e Desenvolvimento, pela Comissão Examinadora:

 Assinado de forma digital
por Luis Roberto Almeida
Gabriel Filho:26878761867
Dados: 2023.07.31
08:36:09 -03'00'

Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Gestão Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP
- Tupã/SP

 Documento assinado digitalmente
PAULO SERGIO BARBOSA DOS SANTOS
Data: 31/07/2023 08:00:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PAULO SÉRGIO BARBOSA DOS SANTOS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP -
Tupã/SP

 Documento assinado digitalmente
JAIR ANTONIO CRUZ SIQUEIRA
Data: 29/07/2023 15:34:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JAIR ANTONIO CRUZ SIQUEIRA (Participação Virtual)
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste -
Cascavel/PR

Tupã, 28 de julho de 2023

THIAGO PERES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PREDIÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM TERMOELÉTRICA À BIOMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e
Desenvolvimento (UNESP/Tupã), como requisito para obtenção do título de Mestre.

Banca examinadora

Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho
(Orientador) PGAD – FCE-UNESP

Prof. Dr. Paulo Sergio Barbosa dos Santos
FCE-UNESP

Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
UNIOESTE

Dissertação defendida e [28 de julho de 2023] em:

[Ambiente Virtual]

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é realizar uma boa estimativa para a potência gerada por pequenas termoelétricas que geram eletricidade a partir de resíduos em caldeiras de biomassa. E assim, com somente algumas variáveis do sistema, tal como pressão e temperatura, buscou-se utilizar modelos matemáticos baseados em regressões polinomiais e sistemas de inteligência artificial (neuro-fuzzy). A base metodológica é a pesquisa qualitativa e quantitativa. Qualitativa, no que se refere às análises das características categóricas intrínsecas do sistema de cogeração. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os vários tipos de biomassa, como bagaço de cana-de-açúcar, Eucalyptus e guapuruvu, utilizados para geração de energia elétrica, e também uma pesquisa nos dados levantados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mostrando o cenário brasileiro sobre demanda e consumo de energia elétrica. O caráter quantitativo se deu posteriormente, onde, foram estudados todos os parâmetros elétricos, e de temperatura e pressão de uma turbina em funcionamento. Após realizada uma análise de correlação entre todos os parâmetros com a potência do sistema, elegeu-se um parâmetro específico de pressão e outro de temperatura que melhor descrevessem o sistema. Sendo assim, foi possível estabelecer funções do tipo $f: R^2 \rightarrow R$, $z=f(x,y)$, a qual regia todo comportamento da potência z frente a pressão x e temperatura y . Tais funções foram geradas a partir de modelos de regressão múltipla (linear e quadrática) e também de um sistema baseado em inteligência artificial neuro-fuzzy. Nisso, foi possível elaborar resultados gráficos tridimensional e bidimensional, que conseguiram demonstrar o ponto ótimo de temperatura e pressão para um melhor rendimento na geração de energia elétrica. Os modelos mostraram-se excelentes, com coeficiente de determinação R^2 variando entre 0,96 e 0,97. Concluiu-se que é possível prever com grande grau de precisão a potência a ser gerada pelo sistema de cogeração, a partir de informações como pressão e temperatura do sistema. Como era de se esperar, o modelo neuro-fuzzy mostrou-se com menores erros e melhores índices de validação. Todavia, como o modelo de regressão linear múltipla possuiu um valor alto de R^2 , e devido à sua simplicidade de aplicação, a sua utilização também em tais sistemas pode sim ser considerada como uma alternativa simples e eficaz, já que foi possível obter os resultados com grande grau de precisão.

Palavras-Chave: Geração de Energia Elétrica. Eficiência Energética. Inteligência artificial.

ABSTRACT

The objective of this work is to make a good estimate for the power generated by small thermoelectric plants that generate electricity from waste in biomass boilers. And so, with only a few system variables, such as pressure and temperature, mathematical models based on polynomial regressions and artificial intelligence systems (neuro-fuzzy) were used. The methodological basis is qualitative and quantitative research. Qualitative, with regard to the analysis of the intrinsic categorical characteristics of the cogeneration system. A bibliographic research was carried out on the various types of biomass, such as sugarcane bagasse, Eucalyptus and guapuruvu, used for electricity generation, and also a research on the data collected by the Energy Research Company (EPE) showing the Brazilian scenario on electricity demand and consumption. The quantitative character came later, where all electrical parameters, and temperature and pressure of a turbine in operation were studied. After performing a correlation analysis between all the parameters with the power of the system, a specific parameter of pressure and another one of temperature that best described the system was chosen. Thus, it was possible to establish functions of the type $f: R^2 \rightarrow R$, $z=f(x,y)$, which governs the entire behavior of power z against pressure x and temperature y . Such functions were generated from multiple regression models (linear and quadratic) and also from a system based on neuro-fuzzy artificial intelligence. In this, it was possible to elaborate three-dimensional and two-dimensional graphic results, which were able to demonstrate the optimum point of temperature and pressure for a better performance in the generation of electric energy. The models proved to be excellent, with an R^2 determination coefficient varying between 0.96 and 0.97. It was concluded that it is possible to predict with a high degree of precision the power to be generated by the cogeneration system, based on information such as pressure and temperature of the system. As expected, the neuro-fuzzy model showed lower errors and better validation rates. However, as the multiple linear regression model had a high value of R^2 , and due to its simplicity of application, its use also in such systems can indeed be considered as a simple and effective alternative, since it was possible to obtain the results with great degree of accuracy.

Keywords: Electric Power Generation. Energy Efficiency. Artificial intelligence.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CF – Constituição Federal

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. JUSTIFICATIVA	14
3. PRESSUPOSTOS TEÓRICOS	16
3.1 Biomassa como Combustível para Geração de Energia em Termelétrica	16
3.2 Caracterização da Biomassa e Impactos no Processo de Combustão.....	20
4. METODOLOGIA.....	21
4.1 Método de análise estatística das variáveis e análise de regressão.....	22
4.2 Método de elaboração dos modelos Neuro-fuzzy ANFIS.....	24
4.3 Validação dos modelos	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Análise estatística das variáveis.....	29
5.2 Análises de regressão linear múltipla	35
5.3 Análises de regressão quadrática múltipla.....	37
5.4 Modelo neuro-fuzzy ANFIS	39
5. CONCLUSÕES.....	46
6. REFERÊNCIAS	47

Lista de Figuras

Figura 1: Modelo de Caldeira para combustão de biomassa.	20
Figura 2: Estrutura do Método Analítico (MA).....	22
Figura 3: Função de pertinência generalizada em forma de sino das variáveis de entrada dos modelos propostos.	24
Figura 4: Arquitetura típica de um modelo ANFIS (BENINI, 2007).....	25
Figura 5: Dados a serem considerados das variáveis de entrada (Temperatura e Pressão) e saída (Potência) dos modelos matemáticos deste trabalho.	32
Figura 6: Dados a serem considerados das variáveis de entrada (Temperatura e Pressão) e saída (Potência) dos modelos matemáticos deste trabalho.	33
Figura 7: Histograma das variáveis de entrada (Temperatura e Pressão) e saída (Potência) dos modelos matemáticos deste trabalho.	34
Figura 8: Superfície tridimensional do modelo de regressão quadrática múltipla $z = -1038,8 + 5,288 x + 5,304 y + 0,003489 xy - 0,002522 x^2 - 0,005291 y^2$	36
Figura 9: Mapa de Contorno do modelo de regressão quadrática múltipla $z = -1038,8 + 5,288 x + 5,304 y + 0,003489 xy - 0,002522 x^2 - 0,005291 y^2$	36
Figura 10: Superfície tridimensional do modelo de regressão linear múltipla $z = 935,56 + 6,2574 x - 0,9290 y$	38
Figura 11: Mapa de Contorno do modelo de regressão linear múltipla $z = 935,56 + 6,2574 x - 0,9290 y$	38
Figura 12: Delimitadores das funções de pertinência das variáveis de entrada após a modelagem neuro-fuzzy (ANFIS).	39
Figura 13: Erros obtidos durante o processo de treinamento do modelo ANFIS.	40

Figura 14: Visão geral do modelo neuro-fuzzy (ANFIS) para obtenção da Potência do sistema.	42
Figura 15: Superfície tridimensional e mapas de contorno da variável de saída.	43
Figura 16: Valores preditos pelo modelo ANFIS em comparação com valores reais da variável de saída.	45

Lista de Tabelas

Tabela 1: Correlação de todas as variáveis do modelo com a Potência Ativa Trifásica.	29
Tabela 2: Correlação de todas as variáveis do modelo entre si.	30
Tabela 3: Correlação das variáveis de entrada do modelo matemático (Pressão e Temperatura) com a com a Potência Ativa Trifásica (Saída), após tratamento estatístico.	32
Tabela 4: Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas nos modelos matemáticos.	33
Tabela 5: Análise da variância para a regressão linear múltipla.	35
Tabela 6: Coeficientes da reta de regressão linear múltipla.	35
Tabela 7: Análise da variância para a regressão linear múltipla.	37
Tabela 8: Coeficientes da reta de regressão quadrática múltipla.	37
Tabela 9: Parâmetros das funções de pertinência das variáveis de entrada.	39
Tabela 10: Limites inferior e superior das variáveis envolvidas no modelo.	40
Tabela 11: Coeficientes associados às variáveis de entrada e termo independente para a composição de cada regra do modelo elaborado.	41
Tabela 12: Índices de verificação da qualidade do modelo neuro-fuzzy (ANFIS) quando comparado com o modelo de regressão linear múltipla.	44

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica por usinas termelétricas envolve a produção de eletricidade a partir da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo ou gás natural, ou por meio da queima de biomassa. Nos processos que geram a energia térmica por meio da combustão de combustíveis fósseis para aquecer água e produzir vapor, são marcadores pela produção de dióxido de carbono (CO_2), sendo um dos causadores do aquecimento global e das mudanças climáticas (FERNANDES, 2015). No caso da queima de biomassa proveniente de cavacos de madeira, a produção de CO_2 não é considerada causadora do aquecimento global, visto que as quantidades geradas são insignificantes (FERNANDES, 2015; RIBEIRO, 2018).

Desta forma, a utilização de usinas termoelétricas é amplamente utilizada em todo o mundo devido à sua capacidade de fornecer energia elétrica de forma contínua e confiável, tempo de construção (muito menor do que uma hidrelétrica), custo de implantação, disponibilidade logística de combustível, rede de distribuição de energia (MEYER, EHIMEN, HOLM-NIELSEN, 2018). Além disso, as usinas termoelétricas movidas a biomassa, que utilizam resíduos orgânicos como combustível, são consideradas uma fonte de energia renovável, uma vez que a biomassa pode ser regenerada ao longo do tempo, conforme apresentam Siqueira, (2020), Meyer, Ehimen e Holm-Nielsen (2018) e Furtado et al (2012). No entanto, é importante garantir que a biomassa seja gerenciada de forma sustentável, levando em consideração os impactos ambientais e sociais.

De acordo com Furtado et al (2012) é importante considerar os aspectos ambientais relacionados a essa transformação visto que a queima de biomassa para geração de energia pode ser uma alternativa sustentável, pois utiliza resíduos orgânicos que, de outra forma, poderiam ser descartados e contribuir para o resíduo do meio ambiente. No entanto, é necessário garantir práticas de manejo de biomassa para evitar efeitos negativos, como a emissão excessiva de poluentes atmosféricos realizando, por exemplo, controles de emissão de gases e utilizando filtros de controle de emissão de partículas.

O objetivo do presente trabalho é realizar uma boa estimativa para a predição de energia elétrica gerada por pequenas termoelétricas que geram eletricidade a partir de cavaco de madeira em caldeiras de biomassa. E assim, com somente algumas variáveis do sistema, tal como pressão e temperatura, buscou-se utilizar modelos matemáticos baseados em regressões polinomiais e sistemas de inteligência artificial (neuro-fuzzy).

2. JUSTIFICATIVA

Vale ressaltar que a eficiência das usinas termoeletricas varia dependendo do tipo de combustível utilizado e da tecnologia empregada. Por exemplo, as usinas termoeletricas a carvão tendem a ter uma eficiência menor em comparação com as usinas a gás natural de ciclo combinado, que utilizam a queima de gás natural em uma turbina e aproveitam o calor residual para gerar vapor em uma caldeira adicional.

É importante considerar que, em um contexto de transição energética e busca por fontes mais limpas e renováveis, a geração de energia elétrica por termoeletricas a combustíveis fósseis tem sido gradualmente substituída por fontes de energia renovável, como solar, eólica e hidrelétrica. Essas fontes têm menor impacto ambiental e causam a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Importante salientar que, os recursos naturais, uma vez esgotados, alguns não se regeneram e outros demoram muitos anos, não sendo simples a tarefa de restabelecê-los, quando possível. Desta forma, a proposta do projeto é a análise matemática para prever a geração de energia elétrica uma planta térmica com caldeira a biomassa, sendo uma fonte renovável, de modo a preservar o meio ambiente, com foco na sustentabilidade e segurança energética.

Com esta finalidade, bem como com o intuito de valorizar a qualidade de vida atual e para as futuras gerações e também garantir o atendimento seguro de energia e competitividade comercial é que se propõe nesse trabalho a utilização da biomassa por meio da utilização resíduos naturais para geração de energia elétrica.

Para tanto, se faz necessário a montagem de um conjunto caldeira-gerador para se verificar quais os melhores “arranjos” de utilização da biomassa para um melhor aproveitamento energético.

O tema é muito importante com vasto campo para pesquisa, tudo em afinidade com a área de concentração do Agronegócio e Desenvolvimento, na linha de pesquisa relações de sustentabilidade. A perspectiva é obter dados e conclusões como a quantidade de energia gerada de acordo com o material que será utilizado na caldeira. Espera-se que esses resultados possam contribuir tanto para o estudo teórico com as estimativas de geração de energia elétrica de um conjunto caldeira-gerador já existente.

Além das relações com as grandezas medidas no processo de geração de energia elétrica, como em questões de ordem pragmáticas, destaca-se a disseminação de conhecimentos no campo da docência, principalmente por meio dos Objetivos de

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 28/07/2025.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível concluir que, levantar e coletar as variáveis de um sistema termelétrico para geração de energia para realizar a análise da correlação e construir modelos de regressão e um modelo baseado em inteligência artificial (neuro-fuzzy). Desta forma, foi possível mostrar que, possuindo informações de apenas algumas variáveis (pressão e temperatura), é possível estimar com grande grau de precisão uma das principais variáveis de potência do sistema. Isso permite traçar estratégias para alcançar um resultado mais eficiente em busca do rendimento máximo do sistema, buscando um melhor aproveitamento da relação insumo e produtor final.

Os modelos mostraram-se excelentes, com coeficiente de determinação R^2 variando entre 0,96 e 0,97. Concluiu-se que é possível prever com grande grau de precisão a potência a ser gerada pelo sistema de cogeração, a partir de informações como pressão e temperatura do sistema. Como era de se esperar, o modelo neuro-fuzzy mostrou-se com menores erros e melhores índices de validação. Todavia, como o modelo de regressão linear múltipla possuiu um valor alto de R^2 , e devido à sua simplicidade de aplicação, a sua utilização também em tais sistemas pode sim ser considerada como uma alternativa simples e eficaz.

Outra contribuição desta pesquisa é que o modelo pode ser utilizado para ajustes na configuração de caldeiras com esse tipo de combustível para se ter um melhor rendimento e assim maior quantidade de energia elétrica gerada.

Como desdobramentos futuros da presente pesquisa fica a avaliação e construção de modelos relacionando a viabilidade de implementação de sistemas termelétricos de pequeno porte para atender demandas menores, mas que permitam agregar ganhos ambientais e sociais com a redução do descarte de biomassa em aterros gerando novos postos de emprego e renda.

REFERÊNCIAS

- ABUŞOĞLU, A., KANOĞLU, M. Exergetic and thermodynamic analyses of diesel engine powered cogeneration. Part 1. Formulations Appl Therm Eng, 29 (2009), pp. 234-241.
- ANWAR, S. et al. Predicting surface roughness and exit chipping size in BK7 glass during rotary ultrasonic machining by adaptive neuro- fuzzy inference system (ANFIS). 2017.
- ASHRAE. Handbook HVAC Systems and Equipment. USA: ASHRAE, Inc; 2000.
- BENINI, L. C.; MENEGUETTE JUNIOR, M. Uma Abordagem para modelagem de dados com o uso de Sistemas Neuro-Fuzzy: Aplicações Geoespaciais. Notas em Matemática Aplicada, v. 43, p. 88, 2009.
- Bildirici, M. Economic growth and biomass energy. *Biomass Bioenergy* **2013**, 50, 19–24.
- Bojadziev, G., & Bojadziev, M. (1997). **Fuzzy logic for bussiness, finance and management**. Singapore: World Scientific.
- BRAND, Martha Andreia. Potencial de uso da biomassa florestal da caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia. *Ciência Florestal*, v. 27, p. 117-127, 2017.
- BUSU, Mihail. The role of renewables in a low-carbon society: Evidence from a multivariate panel data analysis at the eu level. *Sustainability*, v. 11, n. 19, p. 5260, 2019.
- Çakir, U., Comakli, K., & Yüksel, F. (2012). The role of cogeneration systems in sustainability of energy. *Energy Conversion and Management*, 63, 196-202.
- Chen, PY; Chen, ST; Hsu, CS; Chen, CC Modelando relações globais entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO2. *Renovar. Sustentar. Energy Rev.* **2016** , 65 , 420–431.
- CHOPRA, S. et al. Taxonomy of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in Modern Engineering Sciences. *Computational Intelligence and Neuroscience*, p. e6455592, 6, 2021.

Çomaklı, k. Economic and environmental comparison of the natural gas fired conventional and condensing combi-boilers J Energy Inst, 81 (4) (2008), pp. 242-246.

Cremasco, C. P. **Aplicação da Lógica Fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. 2008. ix, 97 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2008.

Dahou, T., Dutournié, P., Limousy, L., Bennici, S., & Perea, N. (2019). Recovery of Low-Grade Heat (Heat Waste) from a Cogeneration Unit for Woodchips Drying: Energy and Economic Analyses. *Energies*, 12(3), 501.

Domac, J.; Richards, K.; Risovic, S. Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects. *Biomass Bioenergy* **2005**, 28, 97–106.

Engecass. Caldeira Flamotubular Com Grelha Fixa. Disponível em: <https://www.engecasscaldeiras.com.br/caldeira-flamotubular-grelha-fixa>. Acessado em: 10 de julho de 2023.

ESTEVINHA R., SIQUEIRA J., PIAN L., PAÇO T. A. Gestão eficiente da rega em olival usando sensores de baixo custo e uma plataforma IOT. In: IX Congresso Nacional de Rega e Drenagem. Beja-Portugal: COTR - Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio, 2022.

FERNANDES, Patrícia Isabel Caramona. **Estudo da biomassa florestal residual consumida em centrais termoelétricas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa, 2015.

Frangopoulos C. A. EDUCOGEN, The European educational tools on cogeneration. European Commission. December 2001.

Frangopoulos, CA Cogeneration Technologies, Otimização e Implementação. Em *Iet Engenharia de Energia* ; The Institution of Engineering and Technology: Londres, Reino Unido, 2017; Volume 87.

FURTADO, Thielly Schmidt et al. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 795-802, 2012.

GHOUSH, M. A.; SAMHOURI, M.; AL-HOLY, M.; HERALD, T. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum-protein emulsifier in a model mayonnaise system. *Journal of Food Engineering*, v.84, p.348-357, 2008.

Glushkov, D.; Nyashina, G.; Medvedev, V.; Vershinina, K. Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 2092.

HAIR, J. F. et al. *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009.

IEA. *World Energy Outlook 2019*. Paris. Available online: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (accessed on 20 October 2020).

IPCC. *Climate Change 2014. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; Available online: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf

Johansson, M.T. Bio-synthetic natural gas as fuel in steel industry reheating furnace—A case study of economic performance and effects on global CO₂. *Energy* **2013**, 57, 699–708.

Kanoğlu, M., Dinçer, İ. Performance assessment of cogeneration plants. *Energy Convers Manage*, 50 (2009), pp. 76-81

Luiz Carlos Benini, Messias Meneguette Jr. *Uma Abordagem para Modelagem de Dados com o Uso de Sistemas Neuro-Fuzzy: Aplicações Geoespaciais. Notas em Matemática Aplicada*. ISSN: 2175-3385

https://proceedings.science/series/23/proceedings_non_indexed/48?lang=pt-br

Major, G. Small scale cogeneration. The Netherlands: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies. CADDET Energy Efficiency Analysis Series 1. IEA/OECD; 1995.

Marchenko, O., Solomin, S., Kozlov, A., Shamanskiy, V., & Donskoy, I. (2020). Economic efficiency assessment of using wood waste in cogeneration plants with multi-stage gasification. *Applied Sciences*, 10(21), 7600.

Martins, G. A. & Domingues, O. (2000). Estatística geral e aplicada . Editora Atlas SA.

MEYER, A. K. P.; EHIMEN, E. A.; HOLM-NIELSEN, J. B. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p. 154-164, 2018.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P., CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, 2020.

Onovwiona, H. I., & Ugursal, V. I. (2006). Residential cogeneration systems: review of the current technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 10(5), 389-431.

Pereira, M.F.; Nicolau, V.P.; Bazzo, E. Exergoenvironmental analysis concerning the wood chips and wood pellets production chains. *Biomass Bioenergy* **2018**, 119, 253–262.

Proforbiomed, 2013. Promotion of residual forestry biomass in the Mediterranean basin – Forest biomass of the Mediterranean – quality and end users. Disponível em http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Forest_biomass_end_users.pdf

Ramadhani, F., Hussain, M. A., & Mokhlis, H. (2019). A comprehensive review and technical guideline for optimal design and operations of fuel cell-based cogeneration systems. *Processes*, 7(12), 950.

REN 21. *Renewables 2020. Global Energy Status*; REN21: Paris, France, 2020; Available online: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf (accessed on 20 October 2020).

RIBEIRO, Gabriel Browne de Deus. Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

SALLEH, M. N. M.; TALPUR, N.; HUSSAIN, K. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System: Overview, Strengths, Limitations, and Solutions. (Y. Tan, H. Takagi, Y. Shi, Eds.) Data Mining and Big Data. Anais...: Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2017.

Silva, A. C. D. M. R. (2016). Correlações de eficiência energética em função da potência de termelétricas a biomassa.

SIQUEIRA, Humberto Fauller de. **Panorama mundial da produção e consumo de energia elétrica e a participação do setor florestal brasileiro**. Sociedade de investigações florestais. Disponível em <<https://sif.org.br/2020/05/panorama-mundial-da-producao-e-consumo-de-energia-eletrica-e-a-participacao-do-setor-florestal-brasileiro/>> acesso em 30 outubro. 2022.

Wilkinson, B.W.; Barnes, R.W. Cogeneration of electricity and useful heat. CRC Press Inc. (1980)

Zhao, W.; Zou, R.; Yuan, G.; Wang, H.; Tan, Z. Relação de Cointegração de Longo Prazo entre o Desenvolvimento de Energia Eólica da China e as Emissões de Carbono. *Sustainability* **2019** , *11* , 4625.

ZIRITT-TREJO, G. et al. Estimating competitiveness in the food service market using fuzzy logic. *Journal of Management Information and Decision Sciences*, v. 25, n. 5S, p. 1-17, 2022.