

CAPÍTULO 3

MAPAS COGNITIVOS FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE FONTES ENERGÉTICAS MUNDIAIS, COM FOCO NO BRASIL

Data de aceite: 01/12/2023

Márcio Mendonça

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica PP/
CP
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica PP/
CP
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/1857241899832038>

Marcio Jacometti

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Departamento acadêmico das ciências
humanas e sociais aplicadas (DACHS)
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/8509336134084374>

Guilherme Cyrino Geromel

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo – IFSP
Piracicaba - SP
<http://lattes.cnpq.br/7535398878830738>

Kazuyochi Ota Junior

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Mestre - PPGEM-CP - Programa de Pós-
Graduação Multicampi em Engenharia
Mecânica
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/3845751794448092>

Ronie Ribeiro Camargo

Centro Estadual de Educação Tecnológica
Paula Souza
Etec 066 - Jacinto Ferreira de Sá
Ourinhos – SP
<http://lattes.cnpq.br/6299821609134231>

Gabriel Henrique Oliveira Uliam

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Egresso - Centro Estadual de Educação
Tecnológica Paula Souza
Departamento Acadêmico de Engenharia
Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/9917773125320806>

Luiz Francisco Sanches Buzzacchero

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia
Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/1747856636744006>

Edinei Aparecido Furquim dos Santos

Governo do Paraná Secretaria de estado da Fazenda
Maringá – PR
<http://lattes.cnpq.br/8706436030621473>

João Maurício Hypólito

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Departamento Computação-FATEC
Ourinhos – SP
<http://lattes.cnpq.br/5499911577564060>

Andressa Haiduk

Dimension Engenharia
Ponta Grossa - PR
<http://lattes.cnpq.br/2786786167224165>

Marcos Antônio de Matos Laia

Universidade Federal de São Joao Del Rei
Departamento De Ciência Da Computação – UFSJ
São Joao Del Rei - PR
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

Angelo Feracin Neto

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/0580089660443472>

Fabio Rodrigo Milanez

Faculdade da Industria Senai
Londrina – PR
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

Vicente de Lima Gongora

Faculdade da Industria Senai
Londrina – PR
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

Michelle Eliza Casagrande Rocha

Egresso Universidade Norte do Paraná – Unopar – Kroton
Londrina - PR
<http://lattes.cnpq.br/4411484670091641>

RESUMO: A geração de energia elétrica no Brasil e suas fontes potenciais foram analisadas usando mapas cognitivos fuzzy, uma técnica de inteligência artificial. O foco foi avaliar a viabilidade dessas fontes com base em custo-benefício, impacto ambiental e disponibilidade. As fontes renováveis, como hidroeletricidade e solar, destacaram-se em custo-benefício

e impacto ambiental, mas enfrentam desafios de disponibilidade em certas regiões. A abordagem utilizada fornece uma visão integrada, útil para decisões sobre a transição energética no país, abrindo espaço para futuras investigações neste campo.

PALAVRAS-CHAVE: Geração de Energia Elétrica, Mapas Cognitivos Fuzzy, Análise quantitativa.

FUZZY COGNITIVE MAPS APPLIED IN THE EFFICIENCY OF DIFFERENT WORLD ENERGY SOURCES, SPECIALLY FOR BRAZIL

ABSTRACT: The generation of electric power in Brazil and its potential sources were analyzed using fuzzy cognitive maps, an artificial intelligence technique. The focus was to evaluate the viability of these sources based on cost-benefit, environmental impact, and availability. Renewable sources, such as hydroelectricity and solar, stood out in terms of cost-benefit and environmental impact, but face availability challenges in certain regions. The approach used provides an integrated view, useful for decisions regarding the energy transition in the country, paving the way for future research in this field.

KEYWORDS: Electric Power Generation, Fuzzy Cognitive Maps, Quantitative Analysis.

INTRODUÇÃO

Em tempos de indústria 4.0, Internet das coisas, sistemas computacionais inteligentes em robôs com habilidades similares a seres humanos, exploração em outros planetas como Marte, praticamente todas as atividades industriais, comerciais e residenciais dependem da energia elétrica (MENDONÇA *et al.*, 2019).

À medida que a humanidade torna-se mais dependente desse insumo surgem questões como: a maneira que produzimos energia é realmente a mais eficiente? Teremos energia para todos no futuro? Instituições como a Agência Internacional de Energia (AIE), a Administração de Informações sobre Energia (EIA) dos EUA e a Agência Ambiental Européia (EEA) registram e publicam dados de energia periodicamente (BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2016).

Assim é possível ter uma base de quanta energia elétrica está sendo produzida e consumida em escala mundial. Na figura 1 é mostrado o aumento do consumo de energia elétrica a nível mundial, a partir da década de 1960 até 2015.

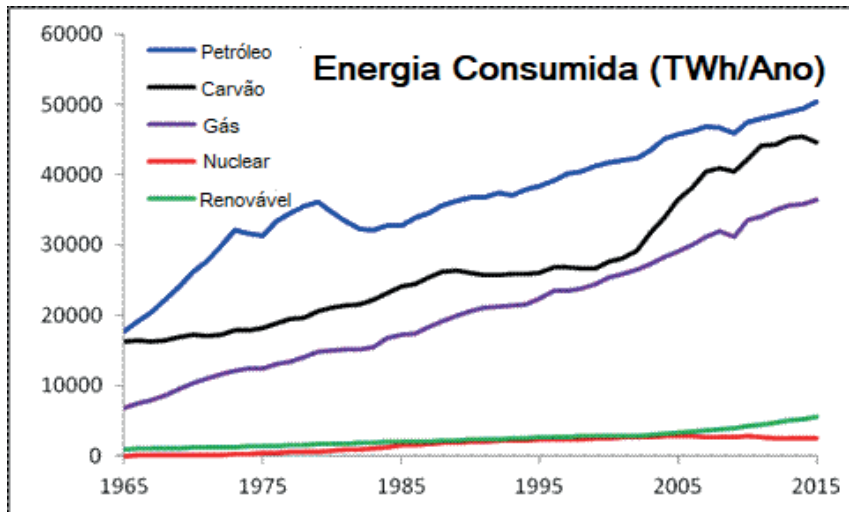


Figura 1: Aumento da energia consumida a nível mundial

Fonte: BP Statistical Review of World Energy (2016)

É evidente que a busca por fontes de energia renováveis e eficientes tornou-se uma das prioridades do cenário mundial. Com a crescente dependência de tecnologias que exigem energia elétrica e o potencial de catástrofes se houver uma interrupção substancial na oferta de energia, a pesquisa e desenvolvimento nessa área é imperativa.

A metodologia proposta para avaliar a viabilidade de diferentes fontes de energia utilizando Mapas Cognitivos Fuzzy (FCM) é interessante e promissora. O FCM pode ajudar a incorporar as nuances e inter-relações entre variáveis, o que é especialmente relevante para um campo tão complexo quanto a geração de energia.

Os critérios mencionados, custo de construção e instalação, energia produzida, impacto ambiental, custo de operação e confiabilidade, são vitais para uma avaliação completa. Compreender como cada fonte se compara em cada um desses critérios pode oferecer insights valiosos para decisões políticas e de investimento.

Os trabalhos citados também ressaltam a crescente importância da pesquisa nesta área. O trabalho de Samper e Rivera (2008) sobre a modelagem de custos usando abordagens fuzzy, e a pesquisa de Zhen Li (2011) sobre as emissões de carbono no Reino Unido, indicam o quão diversificados são os aspectos a serem considerados.

A contextualização brasileira apresenta um desafio e uma oportunidade únicos, especialmente com a crescente demanda de veículos elétricos. O potencial do Brasil para geração de energia limpa, como você mencionou, especialmente a solar, é vasto e ainda amplamente inexplorado.

Em suma, a pesquisa proposta é relevante e tem o potencial de contribuir significativamente para o campo da geração de energia no Brasil e no mundo. Uma das

energias renováveis que vem ganhando destaque é a biomassa.

Biomassa é uma fonte de energia renovável e sustentável, que pode ser utilizada para gerar eletricidade, calor e transporte. É uma matéria-prima de baixo custo e rápido acesso, que armazena grande quantidade de energia, carbono, oxigênio e hidrogênio. A biomassa tem sido uma das energias renováveis em destaque, maiores detalhes são discutidos a seguir:

Os tipos de biomassa estão divididos em dois modos principais

- Biomassa de origem vegetal: inclui madeira, lenha, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos agrícolas e florestais.
- Biomassa de origem animal: inclui esterco, resíduos de abatedouros e biogás.

Com expectativa de mercado livre de energia o trabalho de Tesla Micael *et al.* (2020), menciona os sistemas de negociação no mercado de energia que estão passando por uma rápida transformação devido à crescente demanda por fontes de energia renováveis, a serem integradas à rede elétrica, juntamente com as necessidades dinâmicas e em evolução dos futuros clientes de energia.

No atual sistema de comércio, que se baseia na mega geração, a energia é comercializada por meios inseguros de comunicação baseados na confiança mútua. Além disso, a eletricidade proveniente de fontes renováveis e não renováveis é misturada na rede, impedindo a capacidade dos clientes de rastrear definitivamente a fonte de energia despachada para suas instalações.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a metodologia utilizada. A seção 3 discorre fundamentos e conceitos sobre a ferramenta empregada, o FCM. Já a seção 4 discute os resultados encontrados. E finalmente, a conclusão encerra a pesquisa e apresenta futuros trabalhos.

METODOLOGIA

Para a análise foram escolhidas as principais fontes de produção de energia elétrica por todo o mundo. Essas fontes são: hidroelétrica, solar fotovoltaica, eólica, geotérmica, biomassa, gás natural, termoelétrica e a nuclear. Foram quantificados os valores presentes na tabela 1 (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2019) juntamente com uma série de outras informações complementares.

Escolhidas as fontes a serem analisadas foram então estabelecidos os critérios principais: custo de construção civil, estrutural, equipamentos, projeto e outros custos da concessionária elétrica (preço do dólar em 2018 por quilo watt); a energia média produzida por uma turbina do tipo de usina em Megawatts (MW); a poluição gerada por elas; o custo de operação e manutenção (preço do dólar em 2018 por megawatts hora)entre outros; e por fim a confiabilidade que as mesmas possuem no quesito de entrega de energia e danos colaterais ocasionados por possíveis catástrofes naturais.

Fontes	Construção (2018\$/KW)	Energia Produzida (MW)	Poluição (gCO ₂ /kW _e)	Operação (2018\$/MWh)	Confiabilidade
Hidroelétrica	2.948	500	4	1,36	Alta
Solar	1.783	150	46	0	Média
Eólica	1.624	100	12	0	Média
Geotérmica	2.787	50	45	0	Alta
Biomassa	3.642	50	18	5,7	Alta
Gás Natural	2.205	340	469	7,34	Alta
Termoelétrica	5.169	650	1001	7,31	Alta
Nuclear	6.034	2.234	16	2,37	Alta/Perigosa

Tabela 1: Critério principais para avaliação das usinas elétricas(média)

MAPAS COGNITIVOS FUZZY

Em 1986, Bart Kosko introduziu os Fuzzy Cognitive Maps (FCM) como uma subclasse das Redes Neurais Artificiais (RNA) que retratam o conhecimento simbolicamente, com foco em causas e efeitos. Eles têm vantagens sobre as RNA, incluindo a facilidade de representar estruturas de conhecimento (KOSKO, 1986; NDOUSSEE OKUDA, 1996; PARSOPOULOS et al., 2003). FCMs são usados para modelar sistemas dinâmicos, destacando-se por sua transparência, simplicidade e adaptabilidade (MENDONÇA et al., 2013; PAPAGEORGIOU, 2014).

A construção desses modelos pode ser manual, baseada em especialistas, ou a partir de dados históricos, como demonstrado por YESIL et al. (2013) e MAZZUTO et al. (2018). Os FCM representam variáveis e relações causais, e embora possam resultar em modelos complexos, são valiosos para inferir decisões em ambientes incertos (KOSKO, 1986). Estão sendo aplicados em áreas como indústria, logística e medicina (MAZZUTO et al., 2018). Eles utilizam certas equações chave para representar relações de inferência.

$$f(x_i) = f_c\left(\sum_{j=1}^n w_j Xx_j\right) \quad (1)$$

$$f_c = \frac{1}{1-e^{-u}} \quad (2)$$

Conceitos	Descrição
C1	Rendimento Efetivo da Usina Estudada
C2	Custo Total Construção da Usina
C3	Energia Elétrica Produzida
C4	Impacto Ambiental Causado pela Construção e Funcionamento
C5	Custos de Operação e Manutenção da Usina
C6	Confiabilidade
C7	Localização Geográfica (Média)
C8	Vida Útil da Usina seus Componentes Essenciais
C9	Capacidade de Abastecimento (Situações Críticas)
C10	Tecnologia Desenvolvida na Área
C11	Opinião Pública sobre Usina
C12	Demanda Média Solicitada

Tabela 2: Descrição dos conceitos do FCM.

Fonte: Autoria própria(2020).

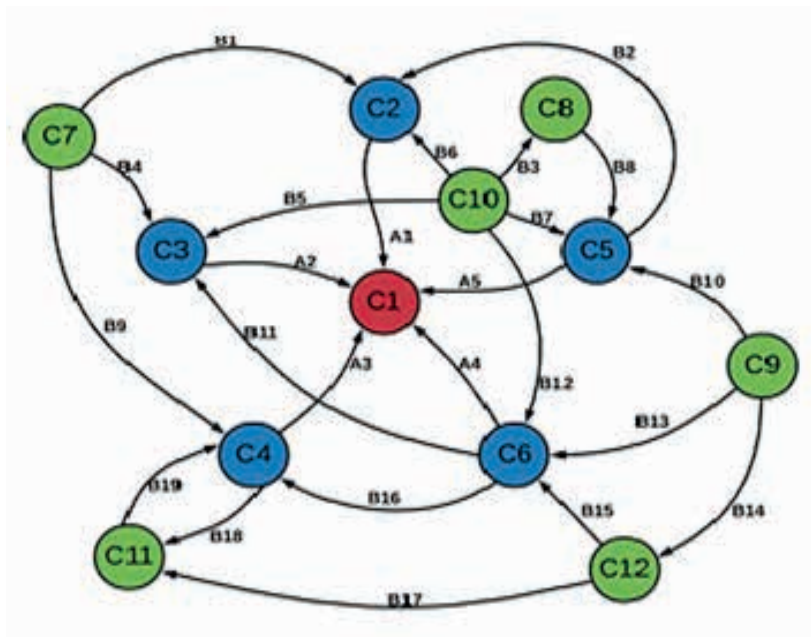


Figura 2: FCM desenvolvido a partir dos conceitos estabelecidos na tabela 2

Na figura 2 é mostrado o FCM desenvolvido, onde C1 é o *output* das relações causais, o rendimento efetivo da determinada usina. O FCM da figura 3 contém os valores de suas relações causais como variáveis, pois cada tipo de fonte energética possui pesos diferentes nas mesmas. Sendo que os conceitos C7, C9, C12 dependem da situação específica de cada usina.

Para fins demonstrativos foram estipulados pesos genéricos médios com o intuito

de desenvolver um FCM genérico, uma vez que estudar cada caso particular das inúmeras usinas existentes está fora do alcance desta pesquisa. Os pesos provenientes do conceito C10 foram mensurados com base no Fator de Otimismo Tecnológico (U.S.ENERGYINFORMATION ADMINISTRATION,2019).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas relações causais do FCM foi desenvolvida a tabela 3, na qual os valores de cada relação foram estimados com base nos dados da tabela 1 e mais uma série de pesquisas para opiniões dos especialistas supracitados no resumo do trabalho.

Peso	Hidroelétrica	Solar	Eólica	Geotérmica	Gás Natural	Biomassa	Termoelétrica	Nuclear
A1	-0,45	-0,3	-0,25	-0,4	-0,35	-0,55	-0,7	-0,8
A2	0,65	0,35	0,3	0,25	0,5	0,25	0,75	1
A3	-0,15	-0,2	-0,1	-0,2	-0,45	-0,15	-0,8	-0,2
A4	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5
A5	-0,2	-0,05	-0,05	-0,05	-0,65	-0,5	-0,65	-0,3
B1	0,4	0,1	0,15	0,5	0,3	0,15	0,2	0,5
B2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,15	0,1	0,15	0,15
B3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,65	0,7
B4	0,5	0,35	0,7	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1
B5	0,5	0,5	0,55	0,5	0,6	0,5	0,65	0,7
B6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5	-0,65	-0,7
B7	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,3	-0,25	-0,3	-0,35
B8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35
B9	0,2	0,1	0,15	0,15	0,3	0,3	0,4	0,5
B10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,35	0,3	0,4	0,45
B11	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
B12	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,65	0,7
B13	0,3	0,35	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
B14	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,25	-0,6	-0,85
B15	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
B16	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,45	-0,2	-0,1
B17	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
B18	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,55	0,7
B19	0,15	0,1	0,1	0,1	0,25	0,2	0,4	0,5

Tabela 3: Valor dos pesos do FCM das diferentes fontes energéticas.

A figura 4 corresponde ao C1, o rendimento da usina hidroelétrica. Também foram gerados os gráficos para as outras fontes: figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11.

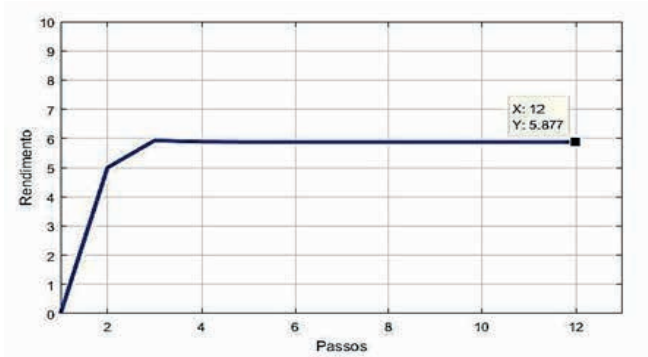


Figura 3: Rendimento para energia hidroelétrica

É possível observar que para energia hidroelétrica, a curva teve comportamento crescente até um valor de rendimento próximo a 6 e, em seguida, se manteve praticamente constante em 5,877.

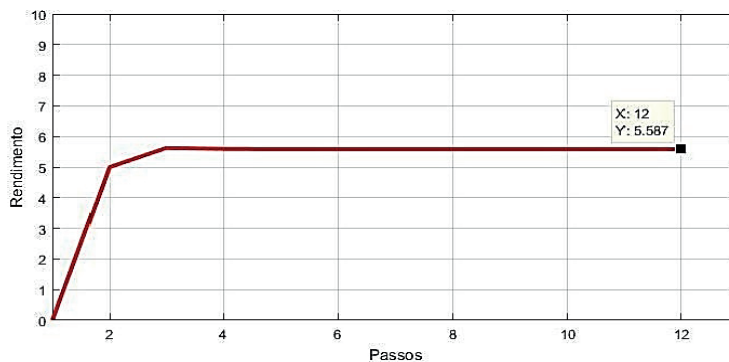


Figura 4: Rendimento para energia solar.

A curva para o rendimento da energia solar se mostrou muito similar ao da energia hidroelétrica, porém seus valores se mantiveram sempre um pouco inferiores, se fixando em 5,587 ao final de 12 passos.

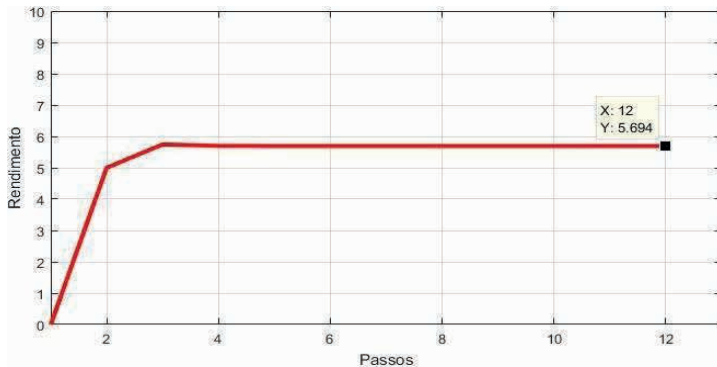


Figura 5: Rendimento para energia eólica.

A curva do gráfico para a energia eólica também se assimilou ao das energias hidrelétrica e solar. Seu rendimento ao final dos 12 passos foi maior que o da energia solar e menor que o da energia hidroelétrica, com valor de 5,694.

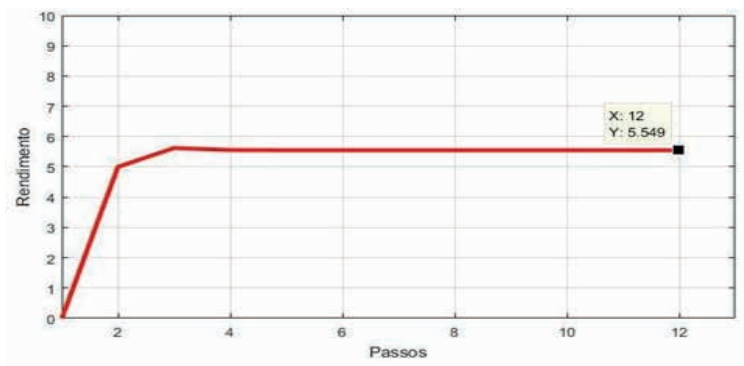


Figura 6: Rendimento para energia geotérmica

Para a energia geotérmica, a curva de rendimento também se assimilou às curvas anteriores, mas com relação aos valores de rendimento ao final dos 12 passos esse tipo de energia obteve valor menor que os apresentados anteriormente, com 5,549.

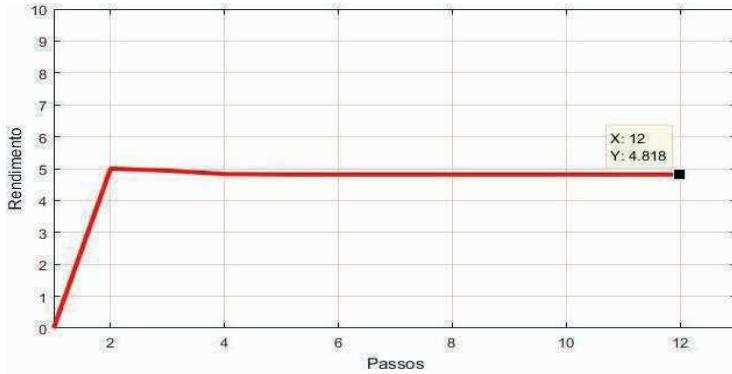


Figura 7: Rendimento para energia do gás natural.

Quanto ao gráfico de rendimento do gás natural, a curva se apresentou com formato diferente das demais apresentadas anteriormente.

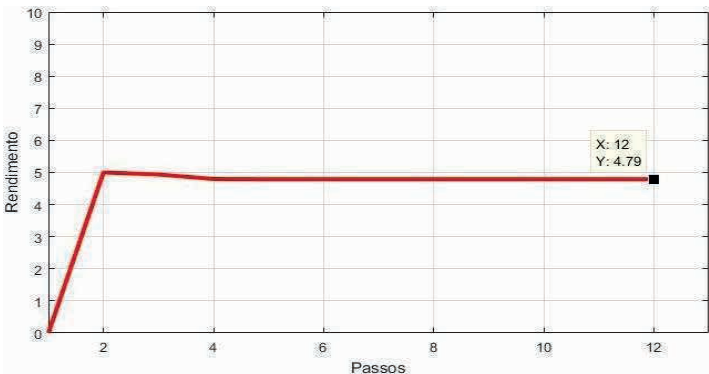


Figura 8: Rendimento para energia da biomassa.

No gráfico da biomassa a curva se mostra com o mesmo comportamento da curva do gás natural. E seu valor de rendimento ao final de 12 passos foi de 4,79.

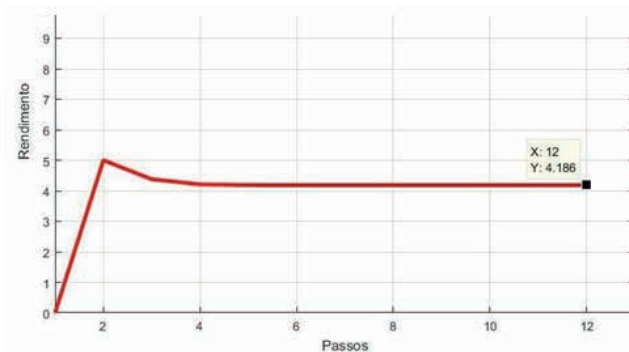


Figura 9: Rendimento para energia da termelétrica.

A curva para o rendimento da termoeétrica apresentou uma característica bem particular, o decréscimo de um rendimento próximo a 5 para 4,186. Sendo este o menor rendimento apresentado com relação às outras energias.

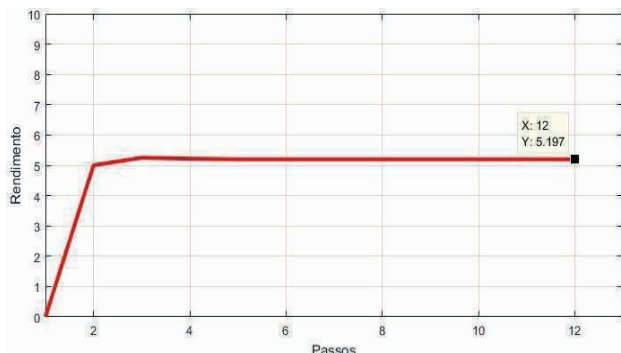


Figura 10: Rendimento para energia nuclear.

O gráfico da energia nuclear mostra que o rendimento ao final de 12 passos foi de 5,197. Os valores de rendimento foram extraídos e comparados na figura 12. Com isso, é possível constatar que a fonte que mostrou ter maior eficiência foi a hidroelétrica.

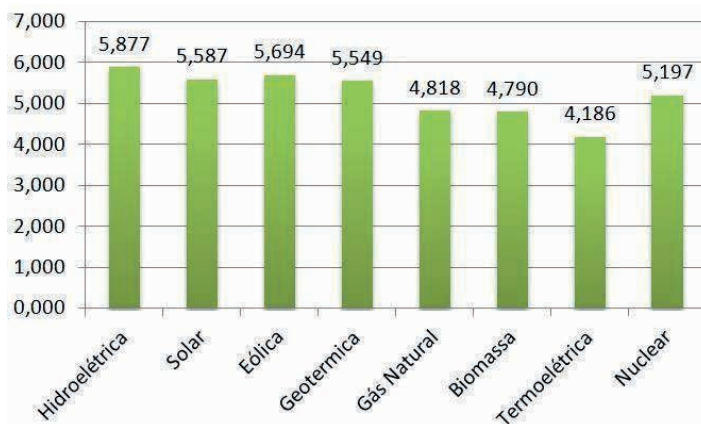


Figura 11: Eficiência das Usinas.

CONCLUSÕES

Os dados disponíveis destacam que as usinas hidrelétricas se sobressaem como líderes em eficiência no campo da geração de energia. Através das hidros turbinas, é possível converter energia com impressionantes taxas de 85-90% de eficiência. Esta alta performance, contudo, vem acompanhada de uma necessidade: vastas bacias hidrográficas. Tal exigência geográfica impõe restrições quanto aos locais adequados para a instalação dessas usinas, tornando algumas regiões inviáveis para esse tipo de empreendimento.

Com base nesse cenário, é imperativo que pesquisas futuras sejam direcionadas não apenas para o aperfeiçoamento dos modelos de simulação existentes, mas também para a incorporação de fatores adicionais que se mostrem relevantes. Estes, por sua vez, deverão ser detalhadamente estudados em suas interconexões causais, visando uma compreensão mais ampla e integrada dos sistemas. Mais do que nunca, torna-se necessário conduzir estudos específicos para as distintas regiões do país, levando em consideração suas particularidades geográficas, socioeconômicas e ambientais. Além disso, a validação rigorosa dos resultados obtidos em tais investigações é crucial para assegurar a confiabilidade e aplicabilidade das informações geradas.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **National Electrical Energy Agency**. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br>. Acesso em: 28 jul. 2020

BP Statistical Review of World Energy. [S. l.: s. n.], 2016. Workbook (xlsx). Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em: 19 jun. 2019.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

JETTER, A.; SCHWEINFORT, W. Buildings scenarios with Fuzzy Cognitive Maps: An exploratory study of solar energy. **Futures**, v. 43, n. 1, p. 52-66, 2011.

KOSKO, B. et al. Fuzzy cognitive maps. **International journal of man-machine studies**, v. 24, n. 1, p. 65-75, 1986.

MARIZ, C. H. da C. **Novas usinas nucleares no Brasil: Uma necessidade para o desenvolvimento do país. Associação Brasileira de Energia Nuclear (Aben)**. 2015. Disponível em: <http://www.aben.com.br/Arquivos/402/402.pdf>. Acesso em: 06 set. 2020.

MAZZUTO, G. et al. Fuzzy Cognitive Maps designing through large dataset and experts' knowledge balancing. In: **2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)**. IEEE, 2018, p. 1-6.

MENDONÇA, M. et al. **Adynamic fuzzy cognitive map applied to chemical process supervision**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 26, n. 4, p. 1199-1210, 2013.

MENDONÇA, M. et al. **Semi-Unknown Environments Exploration Inspired by Swarm Robotics using Fuzzy Cognitive Maps**. IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). 2019.

NDOUSSE, T. D.; OKUDA, T. Computational intelligence for distributed fault management in networks using fuzzy cognitive maps. In: **Proceedings of ICC/SUPERCOMM'96-International Conference on Communications**. IEEE, 1996, p. 1558-1562.

PAPAGEORGIOU, E. I. (Ed.). **Fuzzy cognitive maps for applied sciences and engineering: from fundamentals to extensions and learning algorithms**. Springer Science & Business Media, 2013

PARSOPOULOS, K. E. et al. A first study of fuzzy cognitive maps learning using particleswarmoptimization. In: **he2003CongressonEvolutionaryComputation,2003.CEC'03**. IEEE,2003.p.1440-1447.

PAUSCHERT, D. **StudyofEquipmentPricesinthePowerSector**. Washington, D.C.20433, U.S.A.All:ESMAPTechnicalPaper122/09Study,2009.

PROEST. **PowerPlantConstructionCosts**. [S.l.],6ago.2018. Disponivelem: <https://www.proest.com/power-plant-construction-costs/>. Acessoem:22jun. 2019.

SAMPER, M. E.; VARGAS, A.; RIVERA, S. Fuzzy assessment of electricity generation costsapplied to distributed generation. Comparison with retail electricity supply costs. In: **2008IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**. IEEE,2008.p.1-7.

SILVA, J.etal. Implementationofaphotovoltaicpaneltosupplyelectriccarsenergydemands. **BrazilianArchivesofBiologyandTechnology**. Vol.61,2018.

TESFAMICAEL, A. D. I et al. A Design for a Secure Energy Market Trading System in aNationalWholesale ElectricityMarket. **IEEEAccess**,2020.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Cost and Performance Characteristics ofNewGeneratingTechnologies,AnnualEnergyOutlook2019. **AnnualEnergyOutlook2018**,v.2019,n. January,p.1–3,2019.

W., P. B. et al. **ANNEX II-Methodol**. [s.l.] IPCC Special Report on Renewable EnergySources andClimateChangeMitigation,2011.

YESIL, E.etal. Fuzzy cognitive mapslearningusingartificialbeecolony optimization. In: **2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)**. IEEE, 2013. p.1-8.

ZHENG, Z.; LI, F. Assessment of carbon dioxide efficiencies for UK's electricity generation. In: **2011IEEE Power andEnergySocietyGeneralMeeting**. IEEE,2011.p.1-5.