

Utilização da lógica fuzzy aplicada à energia solar

Felipe Oliva de Godoy¹

Emmanuel Zullo Godinho²

Rodrigo Serra Daltin³

Fernando de Lima Caneppele⁴

RESUMO

A lógica fuzzy é uma metodologia para expor dados imprecisos e qualitativos, comuns na comunicação humana, em uma sequência e forma compreensíveis pelos computadores. Esses sistemas são ferramentas poderosas, que possibilitam a expressão de conceitos que não sejam bem definidos, nos quais usualmente é empregado um nome ou adjetivo para descrevê-los. Este trabalho pretende melhorar os modelos matemáticos para as fontes renováveis de energia, por meio da utilização da teoria fuzzy. Portanto, foi realizada a modelagem de um controlador fuzzy atuando no sistema híbrido de geração de energias renováveis, com o intuito de se obter maior eficiência do sistema híbrido solar-eólico. O trabalho utilizou dados de estações meteorológicas para o desenvolvimento de simulações do sistema. Para o desenvolvimento do controlador, foi utilizado o software Matlab® no módulo Fuzzy Logic ToolBox™, onde foi elaborada toda a teoria fuzzy e aplicada às simulações com o controlador, tendo por objetivo melhorias na eficiência do banco de baterias do sistema.

Termos para indexação: eficiência energética, energia eólica, Matlab.

Ideias centrais

- Lógica fuzzy é ferramenta matemático-computacional; entre outras coisas, auxilia na análise de dados vagos e imprecisos próprios da linguagem humana
- A energia solar e a eólica são fontes de energia que estão em alta no mundo todo, ocupando cada vez mais espaço na matriz energética de muitos países
- As energias alternativas e renováveis são extremamente importantes para o contexto de mitigação de gases de efeito estufa.

Use of fuzzy logic applied to solar energy

ABSTRACT

Fuzzy logic is a method of translating verbal, vague, inaccurate and qualitative expressions, common in human communication, into a sequence and form understandable by computers. These systems are powerful tools that allow the expression of concepts that are not well defined, where a name or adjective is usually used to describe them. The work aims to improve the mathematical models for renewable energy sources through fuzzy application. Thus, modeling of a fuzzy controller was performed, operating in the hybrid renewable energy generation system, in order to develop and obtain a greater efficiency of the solar-wind hybrid system. The work used data from weather stations for the development of system simulations. For the development of the controller, the Matlab® software was used in the Fuzzy Logic ToolBox™ module, where all the fuzzy theory was elaborated and applied in simulations with the controller in order to improve the efficiency of the system's battery bank.

Index terms: energy efficiency, wind power, Matlab.

Recebido em
05/03/2020

Aprovado em
21/05/2020

Publicado em
22/06/2020



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

¹ Engenheiro de Biosistemas, Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, felipe.godoy@usp.br.

² Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Agronomia – Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho, Botucatu – SP, Docente Colégio Agrícola Estadual Adroaldo Augusto Colombo, emmanuel.godinho@unesp.br.

³ Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Elétrica, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho, Botucatu – SP, rs.daltin@unesp.com.

⁴ Engenheiro Eletricista, Doutor em Agronomia – Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho, Botucatu – SP, Docente Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, caneppele@usp.br.

INTRODUÇÃO

Considerando a iminência do esgotamento do uso das energias fósseis e o risco da utilização da energia nuclear, as fontes renováveis provavelmente terão uma importância singular em um futuro próximo. Rosa et al. (2018) citam que as fontes renováveis virão da energia obtida por meio dos biocombustíveis, do sol e do vento. Estes últimos, além de serem fontes inesgotáveis de energia, não alteram o balanço energético do planeta.

A necessidade de substituir fontes de energia tradicionais por energias renováveis vem ganhando força nos últimos anos por conta da preocupação com o meio ambiente; com isso, a energia solar ganha força, por gerar pouco impacto ambiental, já que seu funcionamento não implica qualquer emissão de gases (Lago & Delabeneta, 2018).

Ilimitadas são as fontes de energia. A energia eólica, por exemplo, é grande fontes de energia. Harris (2019) estima que somente 2% de toda a energia solar é convertida em energia de velocidade dos ventos; esse valor percentual, mesmo pífio em números, tem grande importância na produção das geradoras de energia.

Tello Ortiz (2014) informam que os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo do ambiente.

O planeta “ganha” cerca de $1,5 \cdot 10^{18}$ KWh de energia solar, que pode ser aproveitado pela humanidade, o que supriria toda a demanda mundial. Esse fato indica que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar tem potencial para ser uma fonte inesgotável de energia limpa (Pinho & Galdino, 2014).

Por meio de cálculos matemáticos, a lógica fuzzy surgiu da necessidade de preencher um local em que as lógicas tradicionais tinham dificuldade de representar. Por conter apenas lógica binária, algumas propriedades linguísticas, por conterem apenas lógica binária, demandam outro tipo de lógica. Com a lógica fuzzy, foi possível alcançar maior grau liberdade linguística, o que permitiu aos usuários ter maior controle sobre os equipamentos que utilizam essa lógica.

Segundo Zanetti & Mollo Neto (2016), a lógica fuzzy é o estudo dos princípios formais do raciocínio aproximado, diferentemente das lógicas clássicas, que definem apenas a pertinência e a não pertinência de um elemento em um conjunto. A lógica fuzzy é capaz de não só identificar essa pertinência e não pertinência, como também a existência dos valores intermediários entre esses dois conjuntos.

A lógica fuzzy também se propõe a tratar problemas na inteligência artificial, reduzindo as dificuldades corriqueiras nos diversos setores, os problemas de imprecisão nos dados analisados e a incerteza do conhecimento. Neste momento, a lógica fuzzy é, pois, apresentada como uma solução eficiente (Russel & Norvig, 2004).

Em virtude seu desenvolvimento e às suas inúmeras possibilidades práticas, o sistema fuzzy pode ser considerado um avanço para as metodologias de aplicação em produtos industriais, em muitas áreas do conhecimento, facilitando, assim, os processos matemáticos (Veitia Rodrigues & Martínez-López, 2019).

Segundo Barros & Bassanezi (2006), a base de regras cumpre o papel de traduzir matematicamente as informações que formam a base de conhecimentos do sistema fuzzy. As variáveis fuzzificadas devem passar pelo processo de defuzzificação das variáveis de saída, o que pode ser feito usando-se o método dos máximos, da média dos máximos e o método do centroide, que é o mais utilizado. Segundo Shaw & Simões (2001), as reações entre os termos linguísticos utilizados podem ser apontadas iniciando-se com dados matemáticos, imitando, assim, as decisões humanas; por isso, se faz necessária a utilização do método de defuzzificação.

Metodologia teórica da operacionalização da lógica fuzzy

Os controladores fuzzy são compostos por um estágio de entrada (crisp – em que as entradas discretas serão associadas a algum tipo de escala numérica), um estágio de processamento e um outro de saída correspondente. O estágio de entrada mapeará, então, os dados de entrada, de modo apropriado às funções consecutivas e valores verdadeiros. O estágio de processamento refere-se àquele em que se procura obter solução para o problema proposto. Pode-se dividi-lo em três passos básicos: o processo de fuzzificação, as regras de avaliação e, finalmente, o processo de defuzzificação. Na defuzzificação, é invocada cada regra adequada, que gera um resultado para cada uma delas, e, então, combinam-se os resultados dessas regras (Vaz, 2006; MathWorks, 2015).

Em uma etapa final, haverá um estágio de saída, cujo resultado, já defuzzificado da operação, será colocado para dentro do sistema, gerando um controle (saída crisp). Em outras palavras, a interface de fuzzyficação define os valores das variáveis de entrada, faz o escalonamento para condicionar os valores a universos de discursos normalizados e fuzzyfica os valores, transformando os números em um conjunto fuzzy, para se tornarem instâncias de variáveis linguísticas.

A base de conhecimento consiste de uma base de regras que caracteriza a estratégia de controle e suas metas.

A base de dados armazena as definições necessárias sobre discretizações e normatizações dos universos de discurso, as partições fuzzy dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinência.

O procedimento de inferência processa os dados fuzzy de entrada, junto com as regras, para se inferirem as ações de controle fuzzy, aplicando o operador de implicação fuzzy e as regras de inferência da lógica.

A interface de defuzzificação transforma as ações de controle inferidas em ações não fuzzy. Posteriormente, efetua uma espécie de escalonamento, para compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior, como os valores dos universos de discurso reais das variáveis.

A Figura 1 apresenta o esquema representativo de entradas e saída na lógica fuzzy.

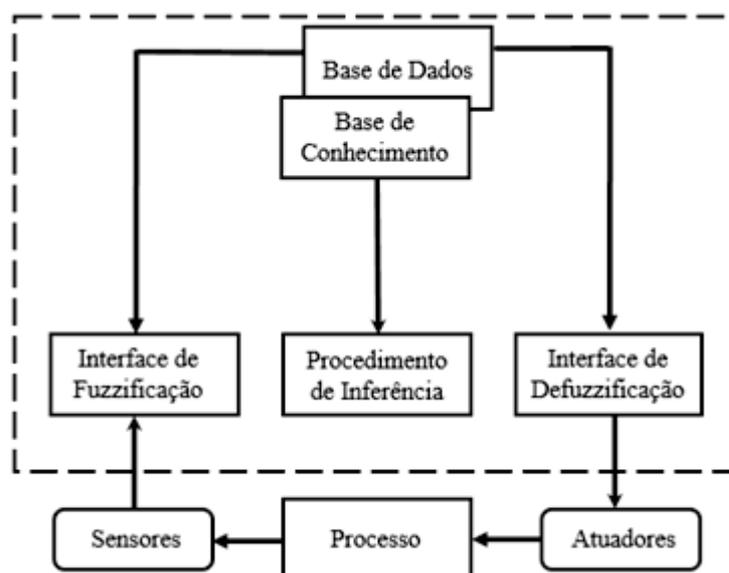


Figura 1. Esquema de um controlador fuzzy.

Fonte: Gomide & Gudwin (1994).

As aplicações da lógica fuzzy estão sendo adotadas em diversas áreas da ciência, principalmente nas da saúde (Jensen & Lopes, 2011), na das energias alternativas, principalmente com energias fotovoltaicas e biocombustíveis (Caneppele & Seraphim, 2010), e na da engenharia de alimentos, com a análise sensorial (Cavalcanti et al., 2013). Outra área que também vem obtendo bons resultados é a do agronegócio, principalmente na cadeia da fruticultura (Bulanon et al., 2009) e nas grandes culturas (como soja, milho e algodão) (Cavichioli et al., 2015). Na cadeia da pecuária, alguns autores recorreram à técnica para alcançar um diagnóstico mais rápido de doenças em pequenos e grandes animais (Sousa et al., 2006), e também em trabalhos com conforto térmico (Pandorfi et al., 2007).

Caneppele (2011) destaca alguns softwares para o desenvolvimento de sistemas fuzzy, como: Mapple®, Matlab®, Mathematica® e Scilab®, sendo este último um software livre. Já para uso específico em sistemas fuzzy, tem-se o Fuzzy Tech.

Fuzzy Logic Toolbox™ é um módulo do software Matlab® desenvolvido pela MathWorks™. Esse módulo oferece um conjunto de ferramentas completas para a manipulação de sistemas difusos, tanto para a construção de modelos quanto para a simulação (MathWorks, 2015). As pesquisas internas em uma indústria ou agroindústria trabalham com dados internos para prolongar a vida útil de um equipamento; nesse sentido, a lógica fuzzy apresenta-se como excelente ferramenta.

O objetivo deste trabalho é aplicar a lógica fuzzy em um sistema híbrido de geração eólico-solar, obtendo-se o máximo de energia das variáveis meteorológicas sobre a produção de energia elétrica..

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Meteorológica da Prefeitura do Campus Fernando Costa da Universidade de São Paulo (USP), que está localizada junto ao Laboratório de Ciências Agrárias, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, no município de Pirassununga, no Estado de São Paulo, com localização geográfica definida pelas coordenadas de latitude e longitude de 21° 57' Sul e 47° 27' Oeste, respectivamente, e altitude média de 630 m acima do nível do mar.

Após a coleta, dados de campo foram inseridos no software Matlab® para a realização das simulações dos modelos fuzzy. Neste software, foi utilizado o módulo Fuzzy Logic Toolbox™, um módulo do software Matlab® desenvolvido pela MathWorks™, que oferece um conjunto de ferramentas completas para a manipulação de sistemas difusos, tanto para a construção de modelos quanto para a simulação (MathWorks, 2015).

Diversas metodologias podem ser utilizadas para a obtenção de dados medidos relacionados ao recurso solar, incluindo o uso direto das medições realizadas para a avaliação do sistema em um dado local (Gabriel Filho et al., 2010). No presente trabalho, foi utilizado um controlador, que funciona por meio do uso da lógica fuzzy, para os dados meteorológicos e de geração de energia.

A Figura 2 está representado o controlador baseado em lógica fuzzy, inserido em um sistema híbrido de geração de energias renováveis.

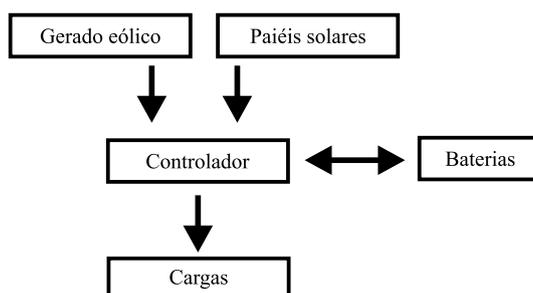


Figura 2. Sistema híbrido solar-eólico.

Toda a metodologia para o controlador fuzzy será realizada com base em Caneppele (2007, 2011). No desenvolvimento do controlador fuzzy, foram consideradas as variáveis de entrada de cinética do vento (VV), da radiação solar (RS) e os estados iniciais de três baterias (BA, BB e BC). Ao desenvolver o controlador, buscou-se, sempre que possível, não deixar nenhuma bateria totalmente descarregada, de forma a prolongar a vida útil delas.

A escolha das variáveis tem por objetivo simular uma situação real de um controlador utilizado em um sistema híbrido para uma pequena edificação desconectada da rede elétrica. Um sistema híbrido é uma opção para esses locais por ser constituído de sistemas combinados para aproveitamento de energia solar e energia eólica, além de baterias para armazenamento da energia excedente e consumo quando da ausência de geração de energia.

Os dados da Tabela 1 foram baseados nos valores obtidos na Estação Meteorológica da Prefeitura do Campus Fernando Costa, em Pirassununga, SP.

Tabela 1. Valores máximo e mínimo usados para cada variável.

Variável	Máximo	Mínimo
Radiação solar ($W m^{-2}$)	1.500	0
Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	15	0
Carga inicial da bateria (V)	14	10

A Tabela 1 está preenchida com os valores mínimo e máximo das variáveis de entrada. Com base nesses resultados, foi desenvolvido um montante de 243 regras, com a saída banco de baterias. Na saída, o controlador decide, por meio das cargas iniciais da bateria e da energia disponível, qual bateria será carregada.

A Tabela 2 indica quais parâmetros foram utilizados para os valores de máximo e mínimo das saídas para as baterias CA, CB e CC.

Tabela 2. Valores considerados para as saídas.

Saída	Máximo (V)	Mínimo (V)
Carga da bateria A (CA)	14	10
Carga da bateria B (CB)	14	10
Carga da bateria C (CC)	14	10

As funções de pertinência – que indicam o conhecimento que se tem em relação à intensidade com que o objeto pertence ao conjunto fuzzy, das variáveis de velocidade do vento, da radiação solar e do estado inicial das baterias A, B e C, respectivamente – tendem a melhorar os dados de lançamento, e representam o valor verdade do elemento, no conjunto fuzzy, que são intervalos matemáticos entre 0 e 1.

No Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB, que utiliza linguagens computacionais do tipo *SE* (condição), *ENTÃO* (consequência), foram inseridas as regras, formando uma espécie de mapa de regras, as quais auxiliam na tomada de decisão na operação do processo.

Por meio das regras, verifica-se que as funções de aplicação só são efetivadas quando existe uma correlação com a lógica fuzzy. Pode-se dizer que, além dessa correlação, existe a união em blocos; esses, por sua vez, têm grande importância na base de regras desse modelo matemático, para que se possa obter um resultado eficaz.

Nesse controlador, foram utilizadas 243 regras, que resultaram na combinação das cinco variáveis de entrada, cada uma delas com três possibilidades linguísticas. Destaca-se que, no MATLAB, é possível realizar, como entradas, valores numéricos factíveis, com o intuito de analisar os valores de saída obtidos nas diversas simulações.

No passo final, deve-se efetuar a defuzzificação, que, por seu turno, calcula a saída dos valores numéricos nas funções de saída, onde foram aplicadas as regras da lógica (Amendola et al., 2005). Simplificando, esse processo é uma etapa da lógica fuzzy, o qual, sob as variáveis de comando executadas, transforma os valores linguísticos em valores numéricos. Com isso, o modelo aplicado consegue determinar os resultados com maior coerência.

O método de defuzzificação utilizado neste trabalho foi o método centro da área, em que o centroide da área é calculado para se obter um resultado lógico, ou seja, o método centroide é um processo que modifica a saída fuzzy em saída discreta, encontrando a média aritmética entre os centros de gravidade dos conjuntos fuzzy, aos quais o elemento pertence, ponderados pelo grau de pertinência associado (Cavalcanti et al., 2013).

A principal desvantagem desse método é que ele se torna difícil de ser executado por conta das funções de pertinência complexas, já que o centroide das áreas não é encontrado facilmente. Alguns autores consideram que muitas das implementações dessa metodologia são apenas aproximações, uma vez que negligenciam a sobreposição de áreas (Furuhashi, 1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, as funções de pertinência mostram o quanto é possível a um elemento pertencer a um determinado grupo. Foram aplicadas as três variáveis fuzzy da velocidade do vento, classificadas como Baixa, Boa e Ótima, juntamente com as variáveis fuzzy da radiação solar de Baixa, Boa e Ótima; e, por fim, as variáveis fuzzy, classificadas como Carga Baixa (Figura 5A), Carga Média (Figura 5B) e Carga Alta (Figura 5C) (Figura 3).

Com base nessas variáveis fuzzy, se dá o processo de defuzzyficação, que gera a combinação das cinco entradas fuzzy em uma única variável de saída – o banco de baterias –, no qual os possíveis resultados não fuzzy da saída foram atribuídos como Carrega-A, Carrega-B e Carrega-C.

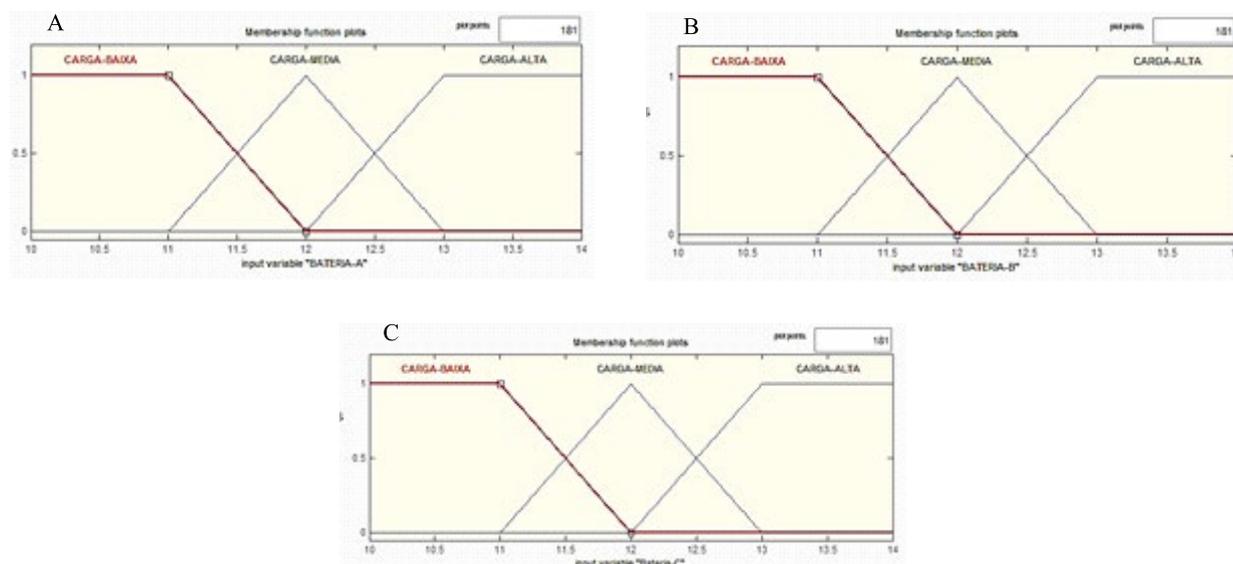


Figura 3. Função de pertinência associada à variável de entrada bateria A (A), bateria B (B) e bateria C (C).

Todas as regras fuzzy foram listadas na Tabela 3. Nela, estão todas as regras necessárias para que o sistema sempre carregue a bateria de menor carga, com o intuito de prolongar a vida útil delas. A Tabela 4 demonstra a combinação das regras, facilitando a compreensão da lógica fuzzy.

Tabela 3. Regras fuzzy para carregamento de bateria com menor carga.

Vento	Sol	Bateria A	Bateria B	Bateria C	Saída
Baixa (0)	Baixa (0)	Carga Baixa (0)	Carga Baixa (0)	Carga Baixa (0)	Carga Baixa (0)
Boa (1)	Boa (1)	Carga Média (1)	Carga Média (1)	Carga Média (1)	Carga Média (1)
Ótima (2)	Ótima (2)	Carga Alta (2)	Carga Alta (2)	Carga Alta (2)	Carga Alta (2)

Tabela 4. Combinação de regras para a lógica fuzzy.

Vento	Sol	Bateria A	Bateria B	Bateria C	Saída	Número de possibilidades
0	0	0	0	0	0	1
0	0					2
...
...
2	2	2	2	2	2	243

Após a construção do controlador fuzzy, foi realizado um teste das regras, a título de exemplo, com os seguintes dados: cinética do vento, 8 m s^{-1} ; radiação solar, 950 W m^{-2} ; carga inicial da bateria A, 13 V; carga inicial da bateria B, 12 V; e carga inicial da bateria C, 14 V.

Os resultados de uma interação nos dados das simulações, nos quais foram colocados valores de entrada, indicaram o resultado de saída do controlador, sendo possível gerar três resultados diferentes nas saídas.

Atente-se que, ao desenvolver um projeto com o sistema de energia fotovoltaica utilizando a lógica fuzzy, devem ser feitas medições de tempo em tempo, para se obter uma alta eficiência nos geradores de energia, incluindo a temperatura e a absorção de luz solar, conforme abordado nos trabalhos de Ebaid et al. (2013) e Vázquez-Guzmán et al. (2015).

A Figura 4 mostra, graficamente, as regras aplicadas no teste da lógica fuzzy, indicando a superfície de resposta do controlador proposto.

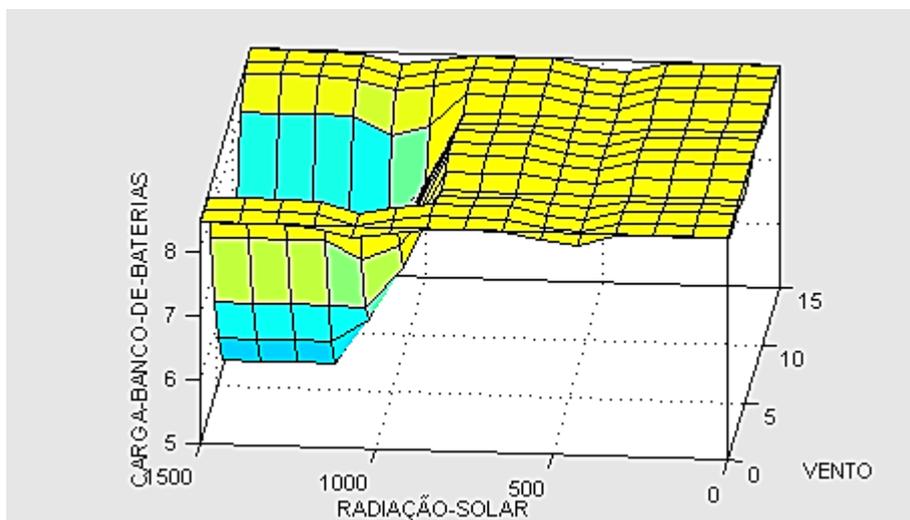


Figura 4. Visualização gráfica das regras.

Nos resultados obtidos na seção anterior, na simulação apresentada, foi possível verificar que o controlador fuzzy conseguiu verificar as regras e obter uma saída, de acordo com o proposto na base de regras. As entradas foram a velocidade do vento, a radiação solar e os estados iniciais das baterias A, B e C.

Com isso, a simulação mostrou-se eficiente, pois o controlador tem como objetivo analisar as cargas iniciais e carregar a bateria com menor carga. Portanto, por meio da simulação, foi possível identificar que, após a defuzzificação, o valor de saída foi 5. Isso quer dizer que a bateria B deve ser carregada. O que torna o resultado plausível é que a menor carga inicial das entradas das baterias é justamente a carga da bateria B. Portanto, o controlador foi eficiente nas simulações e conseguiu atingir um resultado satisfatório, atendendo ao proposto nos objetivos deste trabalho.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um controlador fuzzy para três baterias, em um sistema híbrido solar-eólico, em que a prioridade de recarga nas baterias foi sempre a recarga da bateria com menor carga inicial, de forma que as baterias pudessem atingir uma vida útil maior, em comparação com sistemas convencionais. Para isso, foram utilizados cinco parâmetros: radiação solar, velocidade do vento e os três estados iniciais das baterias. Com os resultados das simulações, foi possível constatar que o objetivo do trabalho foi atingido, pois o sistema sempre conseguiu recarregar a bateria que se encontrava com menor carga.

A utilização da teoria fuzzy permitiu desenvolver e resolver o problema dos bancos de cargas de baterias, as quais não deveriam atingir a carga de zero absoluto, o que poderia comprometer a vida útil delas.

Para trabalhos futuros, propõe-se realizar uma experiência prática que possa confirmar os resultados das simulações – ou seja, não só observar possíveis variáveis, que poderiam influenciar nesse tipo de produção de energia, mas também comprovar a eficiência de controladores fuzzy para tais sistemas.

REFERÊNCIAS

- AMENDOLA, M.; SOUZA, A.L. de; BARROS, L.C. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5.** versão 2. Campinas: Feagri & Imecc/Unicamp, 2005. 44p.
- BARROS, L.C. de; BASSANEZI, R.C. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática.** Campinas: Unicamp, 2006. 382p. (Coleção IMECC. Textos didáticos, v.5).
- BULANON, D.M.; BURKS, T.F.; ALCHANATIS, V. Image fusion of visible and thermal images for fruit detection. **Biosystems Engineering**, v.103, p.12-22, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.009>.
- CANEPPELE, F. de L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar-fotovoltaico e eólico).** 2007. 103p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- CANEPPELE, F. de L. **Sistema fuzzy de suporte à decisão para aplicação de programa de eficiência energética em serrarias.** 2011. 160p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- CANEPPELE, F. de L.; SERAPHIM, O.J. Aplicação da teoria fuzzy no controle de sistemas de geração de energias alternativas. **Energia na Agricultura**, v.25, p.24-41, 2010. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n3p24-41>.
- CAVALCANTI, M.T.; SILVA, F.L.H. da; CAVALCANTI, J.H.F.; FLORENTINO, E.R.; FLORÊNCIO, I.M.; MOREIRA, R.T. Aplicação da lógica fuzzy na análise sensorial de pão de forma enriquecido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.208-2015, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000200012>.
- CAVICHIOLO, A.; GABRIEL, C.P.C.; GABRIEL FILHO, L.R.A.; PUTTI, F.F.; BORDIN, D. Software baseado em regras fuzzy para avaliação da vitalidade da orquídea *Catasetum fimbriatum*. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v.1, p.13-24, 2015.

- EBAID, M.S.Y.; QANDIL, H.; HAMMADB, M. A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer. **Energy Conversion and Management**, v.75, p.780-795, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.083>.
- FURUHASHI, T.; HORIKAWA, S.; UCHIKAWA, Y. On stability of fuzzy control systems using a fuzzy modeling method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, CONTROL, INSTRUMENTATION, AND AUTOMATION, 1992, San Diego. Proceedings. Piscataway: IEEE; Tokyo: SICE, 1992. v.2, p.982-985. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.1992.254450>.
- GABRIEL FILHO, L.R.A.; CREMASCO, C.P.; SERAPHIM, O.J. Análise diferencial da potência máxima gerada por um sistema solar fotovoltaico. **Revista Energia na Agricultura**, v.25, p.123-138, 2010. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n2p123-138>.
- GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R.R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v.4, p. 97-115, 1994.
- HARRIS, J. Can China's Green Socialism transform global capitalism? **Civitas**, v.19, p.354-373, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15448/1984-7289.2019.2.31972>.
- JENSEN, R.; LOPES, M.H.B. de M. Nursing and fuzzy logic: an integrative review. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, v.19, p.195-202, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-11692011000100026>.
- LAGO, S.M.S.; DELABENETA, C. A produção científica brasileira sobre energia solar fotovoltaica no período de 2007 a 2017. **Revista de Administração de Roraima**, v.8, p.416-441, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18227/2237-8057rarr.v8i2.5093>.
- MATHWORKS. **MATLAB: Fuzzy Logic Toolbox™: User's Guide**. Natick, 2015. 368p.
- PANDORFI, H.; SILVA, I.J.O.; GUISELINI, C.; PIEDADE, S.M.S. Uso da lógica fuzzy na caracterização do ambiente produtivo para matrizes gestantes. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.83-92, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100001>.
- PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014. 529p.
- ROSA, C.B.; SILUK, J.C.M.; MICHELS, L.; RIGO, P.D.; REDISKE, G. A gestão da energia solar fotovoltaica sob a ótica da bibliometria. **TECNO-LÓGICA**, v.22, p.113-119, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v22i2.12019>.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Inteligência artificial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.
- SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2001.
- SOUSA, C.A. de; DUARTE, P.S.; PEREIRA, J.C.R. Lógica fuzzy e regressão logística na decisão para prática de cintilografia das paratiróides. **Revista de Saúde Pública**, v.40, p.898-906, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-89102006000600021>.
- TELLO ORTIZ, E.R. **Sistemas fotovoltaicos e eólicos: metodologia para análise da complementaridade espacial-temporal com aplicação no dimensionamento e análise de risco financeiro**. 2014. 178p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29122014-175607/publico/Tese_ElvisTelloOrtiz.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2020.
- VAZ, A.M. **Estudo das Funções de pertinência para conjuntos fuzzy utilizados em controladores semafóricos fuzzy**. 2006. 158p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília.
- VÁZQUEZ-GUZMÁN, G.; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, P.R.; SOSA-ZÚÑIGA, J.M. High efficiency single-phase transformer-less inverter for photovoltaic applications. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, v.16, p.173-184, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.002>.
- VEITIA RODRÍGUEZ, E.R.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, Y. La toma de decisiones en la agricultura con empleo de modelos matemáticos difusos. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v.28, p.1-7, 2019.
- ZANETTI, W.A.L.; MOLLO NETO, M. Construção de algoritmo fuzzy para rastreamento solar com painel fotovoltaico montado em suporte de um eixo. **Enciclopédia Biosfera**, v.13, p.1643-1654, 2016. DOI: https://doi.org/10.18677/EnciBio_2016B_151.