

Gerenciamento do Controle de Trocas de Energia Entre Sistemas Fotovoltaicos e a Rede Elétrica Utilizando uma Abordagem Baseada em Sistemas *Fuzzy*

Marcos V. C. Sousa¹, Filipe de Oliveira Saraiva²

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém – PA – Brasil

[1marksoft@outlook.com](mailto:marksoft@outlook.com), [2saraiva@ufpa.br](mailto:saraiva@ufpa.br)

Abstract. *The benefits of photovoltaic systems (PV) for the environment and the diversification of the energy matrix are notorious, but the harmful effects due to the intermittent nature of these systems (power profile with high variations) can compromise the energy quality of the distribution network. The work aims at a PV power controller system based in fuzzy logic that smoothing the power profile exchanged with the grid and maintains the use battery in levels safe. A comparative simulation with another simpler proposal is performed to attest the gains of the fuzzy proposal to the problem in focus.*

Resumo. *Os benefícios dos sistemas fotovoltaicos (PV) para o meio ambiente e a diversificação da matriz energética são notórios, mas os efeitos nocivos devido à natureza intermitente desses sistemas (perfil de potência com altas variações) podem comprometer a qualidade de energia da rede de distribuição. O trabalho proposto visa um sistema controlador de energia PV baseado em lógica fuzzy que suavize o perfil de potência trocado com a rede elétrica e mantenha a utilização da bateria em níveis seguros. Uma simulação comparativa com outra proposta mais simples e comum em instalações reais é realizada para atestar os ganhos da proposta fuzzy para o problema em foco.*

1 Introdução

Atualmente, sistemas fotovoltaicos (PV) de energia (produção elétrica a partir da luz do sol) são identificados como os mais populares e difundidos meios de geração renovável para residências [LIU et al. 2018]. Além de benefícios ambientais, sistemas fotovoltaicos podem auxiliar na diversificação da matriz energética de um país [JENKINS 2010]. O maior uso desses sistemas irá melhorar o aproveitamento do potencial solar renovável e economizar recursos hídricos em hidroelétricas.

Sistemas ou geradores fotovoltaicos conectados a rede de distribuição são interpretados como geradores distribuídos (GDs) [BOLLEN; HASSAN 2011]. GDs são unidades de geração espalhadas por todo sistema elétrico, alocando-se no nível de geração, transporte ou distribuição [BARROS 2011]. Apesar dos benefícios, a adoção de geradores distribuídos traz para rede problemas estruturais e de operação que afetam, por exemplo, a qualidade de energia [BOLLEN; HASSAN 2011].

Como alternativa para minimizar os problemas causados pelos GDs, as técnicas de inteligência computacional, como lógica *fuzzy*, são aplicadas ao gerenciamento de energia nesses equipamentos [BOLLEN; HASSAN 2011].

Os trabalhos relacionados a uso de controladores *fuzzy* aplicados a sistemas elétricos de produção renovável ligado à rede elétrica de distribuição, geralmente focam na suavização do perfil de potência com a rede elétrica e/ou no uso da bateria de forma a prolongar seu tempo de vida [AVILES 2012; 2014; 2018].

O estudo proposto tem o intuito de construir um sistema controlador inteligente baseado em lógica *fuzzy* que possa intercambiar a energia produzida fotovoltaica entre o consumo residencial, a bateria e a rede elétrica. O foco da proposta é suavizar o perfil de potência trocado com a rede elétrica mantendo a utilização da bateria em níveis seguros. O trabalho também realizará uma simulação onde o modelo proposto será comparado, através de métricas de qualidade de energia, com um modelo mais simples comumente utilizado nas instalações reais. Em ambas as abordagens, o excedente fotovoltaico não aproveitado pela residência ou bateria será dirigido para rede elétrica.

O trabalho se organiza nas seguintes seções: na Seção 2 é feita a descrição da problemática na qual o estudo proposto se insere, na Seção 3 conceituação das técnicas computacionais utilizadas e descrição da construção do controlador *fuzzy*, na Seção 4 detalhamento e apresentação dos resultados e na Seção 5 são finalmente apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 Definição do Problema

Atualmente vários países no mundo enfrentam a questão de diversificação da matriz energética nacional e os problemas ambientais advindo de combustíveis fósseis, ganhando importante destaque as fontes renováveis de energias na solução de ambas as questões [BARROS 2011]. Energias renováveis são os fluxos contínuos e repetitivos de energia encontrados no meio ambiente, ou seja, energia de fontes com fácil acesso na natureza, como a solar, eólica e de biomassa [BOYLE 2012].

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição são basicamente compostos de painéis PV e inversores (Figura 1) podendo incluir baterias [NEOSOLAR 2019]. O prolongamento da vida útil de uma bateria é alcançado através da manutenção do nível de carga da mesma em parâmetros seguros [ANUPHAPHARADORN 2013] evitando descarregamento total e carregamento total [BASTOS 2013].

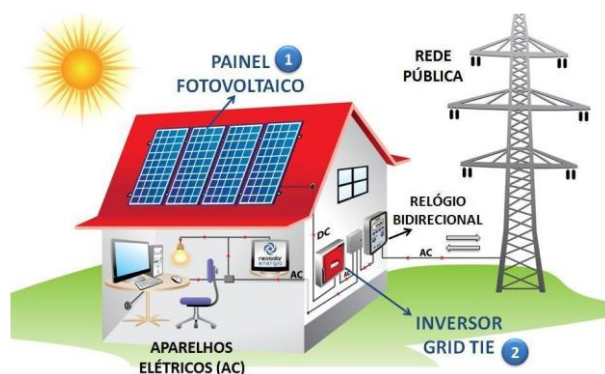


Figura 1. Exemplo de organização de sistema fotovoltaico residencial.

Fonte: NEOSOLAR, 2019.

A natureza intermitente dos geradores distribuídos acaba por provocar variações na sua produção que são absorvidas pela rede elétrica e prejudicam o trabalho desta quando não possui uma predição dessas variações. Por isso a presença de unidades de armazenamento é importante em conjunto com GD para atenuar esse problema e gerenciar o fluxo de potência [AVILES 2012]. As variações também são responsáveis

por inconsistências à rede, como impactos negativos sobre o perfil e regulação da tensão [BARR; MAJUMDER 2015].

O estudo desse artigo propõe melhorar o perfil de trocas com a rede elétrica através do uso da técnica de inteligência computacional chamada lógica *fuzzy* e também manter a utilização da bateria nos limites seguros. Uma simulação comparando a proposta com o recurso *fuzzy* e outra proposta sem o recurso é feita, utilizando métricas de qualidade de energia para analisar os resultados para o período de 1 ano.

Ambas as propostas a serem comparadas em simulação utilizam a mesma estrutura de sistema fotovoltaico e bateria que inclui um gerador fotovoltaico de 2,6 kW, um banco de bateria 70 kWh e um consumo local com taxa de 6,73 kW.

Também é possível deduzir dessa arquitetura as seguintes relações matemáticas e variáveis:

$$P_{liquid} = P_{gerador} - P_{consumo} \quad (1)$$

$$P_{rede} = P_{liquid} - P_{bat} \quad (2)$$

Na Equação (1), $P_{gerador}$ faz referência à leitura de potência de produção fotovoltaica e $P_{consumo}$ refere-se à potência de consumo residencial, ambas em um dado instante. Em Equação (2), P_{bat} seria potência que está entrando ($P_{bat}>0$) ou saindo ($P_{bat}<0$) da bateria e P_{rede} seria uma potência de solicitação à rede de distribuição para atender a uma eventual demanda da residência ($P_{rede}<0$) ou envio de um excedente de produção que não foi aproveitada pela bateria ($P_{rede}>0$).

Na Equação (1), P_{liquid} é definido como o balanço de potência resultante da diferença entre a potência produzida pelo gerador fotovoltaico e a potência consumida pela residência. P_{liquid} foi adotado para reduzir a complexidade das simulações. Em outras palavras, ambas as propostas tentam atender ao consumo residencial com a produção fotovoltaica naquele instante, a sobra disso é então dirigida para bateria ou solicitada dela caso o consumo residencial seja muito maior que a produção.

O nível de bateria será constantemente atualizado. A variável P_{bat} irá abastecer a bateria para todo valor $P_{bat} > 0$, portanto, a carga da mesma tenderá a crescer, mas para $P_{bat} < 0$ acontecerá uma descarga e consequentemente a carga da bateria irá diminuir. O nível de bateria será atualizado segundo o cálculo abaixo.

$$E_{nivel_bateria}(n) = E_{nivel_bateria}(n-1) + \Delta E(n) \quad (3)$$

$$\Delta E(n) = P_{bat}(n) * T_s \quad (4)$$

Onde $\Delta E(n)$ é a energia de uma variável P_{bat} ao longo de um período de tempo T_s ($T_s = 5$ min), sendo $E_{nivel_bateria}(n)$ o nível de bateria atualizado.

Foi adotado *SOC* (*State Of Charge*) para monitorar o nível de abastecimento da bateria. Os valores de *SOC* tem como referência 50% da capacidade máxima de armazenagem da bateria, nos dando uma noção se a bateria está vazia ou cheia. Então $SOC(n) = -50$ indica bateria vazia e $SOC(n) = 50$ indica bateria completamente cheia. O cálculo de *SOC* seguirá a seguinte expressão matemática.

$$SOC(n) = \frac{100(E_{nivel_bateria}(n) - (0,5)C_{bat_max})}{C_{bat_max}} \quad (5)$$

Onde $E_{nível_Pbateria(n)}$ é nível de carga energética na bateria e C_{Pbat_max} é a capacidade máxima da bateria.

É aplicado aos dados de entrada um filtro-passa-baixo (LPF) usado para suavizar perfil de potência trocado com a rede. O LPF é um filtro que separa o componente de baixa frequência enviando para rede e o componente de alta frequência enviando para a bateria tendo um tamanho de janela de 24h [AVILES 2018].

$$P_{LPF} = \frac{1}{M} \sum_{k=n-M}^{n-1} P_{liquid}(k) \quad (6)$$

Onde P_{LPF} é o componente de baixa frequência de P_{liquid} e M é o número de amostras em um dia.

Na próxima seção serão apresentadas importantes fundamentações que serão utilizadas na proposta de estudo.

3 Ferramentas Computacionais: Sistemas Controladores e Fuzzy

Dentre os vários tipos de sistemas, os sistemas controladores se diferenciam por executar tomada de decisão sobre um determinado objeto [SIMÕES; SHAW 2007]. No estudo proposto o objeto é a energia produzida e o fluxo de potência dessa energia. A parte de tomada de decisão de um sistema controlador pode ser tanto baseada em cálculos diferenciais complexos como também por técnicas de inteligência computacional como lógica *fuzzy* [SIMÕES; SHAW 2007].

Lógica *fuzzy* é uma extensão da lógica de multivalores, modelando o modo impreciso do raciocínio humano que é capaz de tomar decisões em um ambiente contendo incertezas e imprecisões [CAVALCANTI et al. 2012]. Sistemas *fuzzy* podem emular a forma de pensar humana em sistema de controle ou sistema computacional, além de ser mais simples de implementar que métodos matemáticos baseados em cálculo diferencial.

Pela proposta desenvolvida, o sistema controlador *fuzzy* gerencia a produção fotovoltaica dirigindo a energia produzida entre residência, bateria e rede elétrica. No caso de a residência necessitar de mais energia que a produzida pelo gerador fotovoltaico, o sistema controlador *fuzzy* solicita energia da bateria e/ou da rede elétrica segundo o que julgue mais vantajoso levando em consideração sua base de conhecimento, independente do período do dia.

A lógica *fuzzy* utilizada é composta de duas entradas (P_{liquid} , SOC) e uma saída (P_{bat}), método de inferência Mamdani e defuzzyficação por Centro de Gravidade [AVILÉS 2018] [SIMÕES; SHAW 2007]. Inicialmente, as funções de pertinência e conjuntos linguísticos foram determinadas interpretando a coleção de dados utilizada na simulação verificando os valores máximos e mínimos das variáveis de entrada e saída. Já as regras foram baseadas nas necessidades subjetivas em cada situação [SIMÕES; SHAW 2007]. Após a configuração inicial, a determinação das funções de pertinências e mapa de regras se deu pela avaliação do comportamento do controlador em cada execução chegando a uma configuração que entregou os melhores resultados. Na Tabela 1 consta o mapa de regras definido.

Tabela 1. Mapa de regras

P_bat		SOC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
P_liquid	PB	PB	PB	PS	PS	NB
	PS	PS	PS	PS	PS	NB
	ZE	PB	PS	ZE	ZE	ZE
	NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
	NB	ZE	ZE	NB	NB	NB

É possível observar pela Tabela 1 que o controlador *fuzzy* possui 25 regras de controle. Tanto as variáveis de entrada e saída possuem 5 conjuntos linguísticos que variam em NB, NS, ZE, PS e PB (interpretação de B “Big”, S “Small”, ZE “Zero”, P “Positive” e N “Negative”). Essa classificação indica a intensidade e quantidade em que se encontra cada uma das variáveis em determinado instante, por exemplo, P_{liquid} indicando “PB” significa que houve um excedente de produção, P_{liquid} indicando “NB” significa que houve um excedente de consumo por parte da residência — P_{liquid} “ZE” indica que não houve excedente na relação entre produção e consumo. O mesmo se aplica a variável SOC (indicando bateria cheia ou vazia) e P_{bat} (indicando injeção ou descarga da bateria). As funções de pertinências na Figura 2 dão uma visão mais clara dessa disposição dos conjuntos linguísticos.

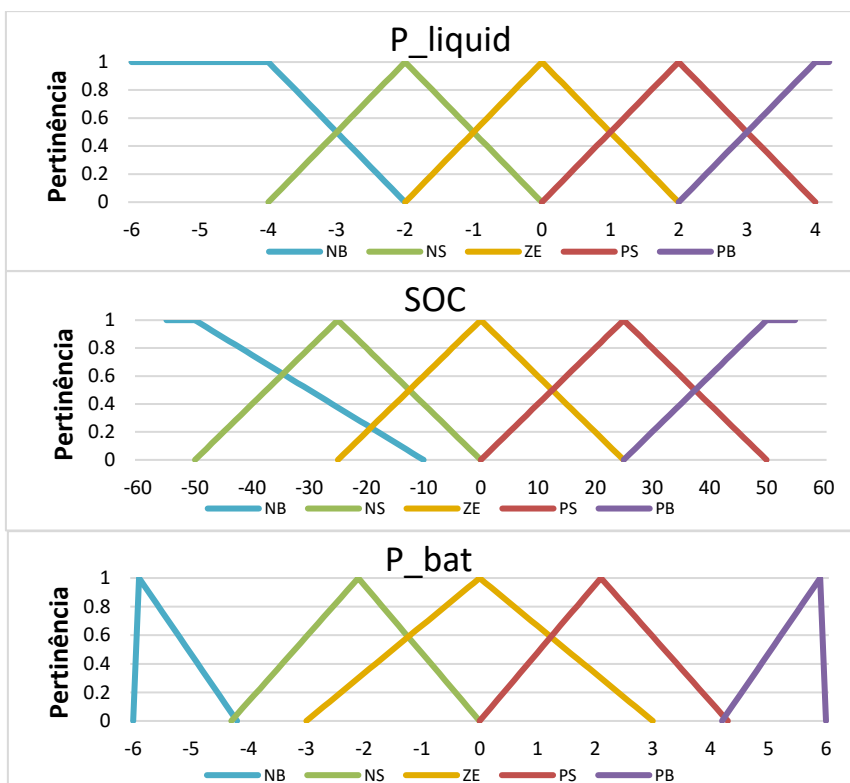


Figura 2. Funções de pertinência das variáveis de entrada e saída.

Sobre as funções de pertinências, identifica-se que foram utilizados a forma triangular e trapezoidal para caracterizar cada um dos conjuntos linguísticos inerentes a cada função de pertinência, sendo o tipo triangular o mais utilizado nessas aplicações. Os valores máximos e mínimos das variáveis de entrada delimitaram as funções de pertinências e foram deduzidos dos datasets utilizados na simulação:

$$-50 < SOC(n) < 50 \quad (7)$$

$$-6 < P_{liquid}(n) < 4 \quad (8)$$

Adotou-se para a variável de saída P_{bat} o comportamento com fluxo de carga ± 6 kW (carregar 6kW e descarregar 6kW).

$$-6 < P_{bat}(n) < 6 \quad (9)$$

Na próxima seção será apresentada a simulação, bem como as especificações do outro controlador com quem haverá comparação. Também conterà as análises dos resultados da mesma.

4 Simulação Computacional

Os dados de entrada foram obtidos em repositório ligado à IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) [IEEE-PES-ISS 2018]. Optou-se pelo dataset de produção de 2013 e o dataset de consumo de 12/2011 a 01/2013 por serem longos e atenderem à proposta. Formatações e equiparações foram efetuadas para refletir um cenário de janeiro a dezembro com período de amostra de 5 em 5 min (total de 103680 amostras anuais).

A estrutura do sistema fotovoltaico usada inclui um gerador fotovoltaico de 2,6 kW, um banco de bateria 70 kWh e um consumo local com taxa de potência de 6,73 kW. A bateria possui carga inicial de 55 kWh.

4.1 Critérios de Avaliação

Os critérios de qualidade para o perfil de potência com a rede utilizado no estudo foram baseados do trabalho [AVILES 2018].

4.1.1 Picos de Potência Negativo e Positivo

Os picos negativos e positivos de potência com a rede, $P_{G,MIN}$ e $P_{G,MAX}$, são definidos como o valor máximo solicitado da rede e o valor máximo alimentado na rede em um ano. Quanto menor os picos melhor é a proposta.

$$M_{G,MIN} = \min(P_{rede}(n)) \quad (10)$$

$$M_{G,MAX} = \max(P_{rede}(n)) \quad (11)$$

4.1.2 Derivação de Potência Média e Máxima

A derivação de potência máxima (MPD) é a máxima taxa-de-mudança (diferença entre duas amostras consecutivas tendo o período de tempo 5min) em um perfil de potência com a rede para um ano. É um valor absoluto.

A derivação de potência média (APD) é a média anual das taxas-de-mudança. Ambos os critérios tem unidade em W/h e quanto menor os valores melhor é a proposta, vide expressões:

$$MPD = \max(|P_{Grid(n)}|) \quad (12)$$

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |P_{Grid(n)}| \quad (13)$$

$$P_{Grid(n)} = \frac{P_{rede(n)} - P_{rede(n-1)}}{T_s} \quad (14)$$

Onde $P_{Grid(n)}$ é a taxa-de-mudança no perfil de potência com a rede, N é numero de amostras em um ano, T_s o período de tempo entre as amostras e “ n ” é a identificação da amostra.

4.2 Estratégia de Controlador Simples Comparado

O controlador simples em seu comportamento utiliza somente o filtro-passa-baixo para suavizar o perfil de potência com a rede, sendo o componente de baixa frequência enviado para rede e o componente de alta frequência dirigido para a bateria [AVILES 2018]. Esse modelo é muito comum em instalações reais.

4.3 Resultados da Simulação

A linguagem JAVA foi utilizada para criar o sistema controlador e o ambiente de simulação. A lógica *fuzzy* implementada em um dos controladores é apoiada pelo framework jFuzzyLogic¹ que possui o propósito de criar sistemas de decisão *fuzzy*. A leitura dos datasets em planilhas Excel é feita através da biblioteca JAVA chamada JExcelApi². As perdas por efeito joule são desconsideradas nesse estudo.

Sobre o perfil de troca de potência com a rede elétrica, P_{rede} , é possível observar na Figura 3 que o controlador *fuzzy* teve um comportamento mais suavizado que o controlador simples, perturbando menos a rede de distribuição nos meses centrais do ano. Isso pode ser comprovado pelas métricas da Tabela 2.

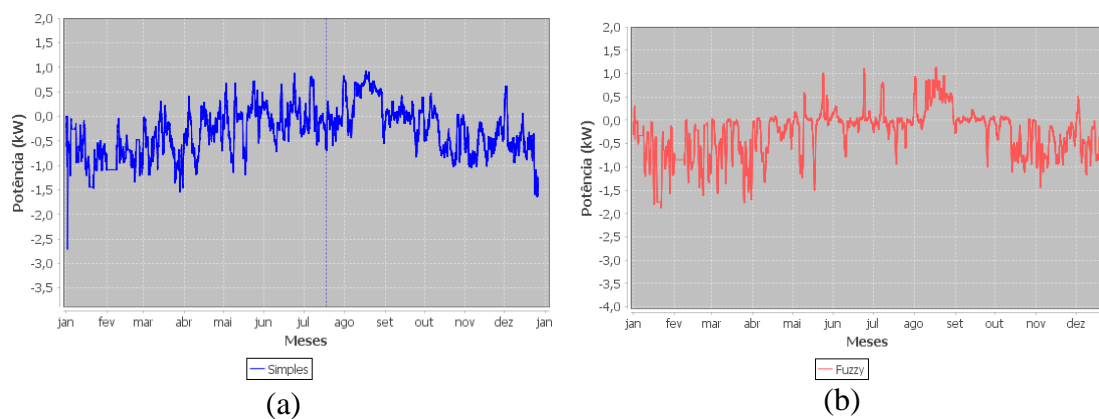


Figura 3. Perfil de trocas de potências P_{rede} com a rede de distribuição do (a) controlador simples e (b) controlador *fuzzy*.

¹ <http://jfuzzylogic.sourceforge.net/html/index.html>

² <http://jexcelapi.sourceforge.net/>

Tabela 2. Comparação de desempenho das abordagens

Estratégia de controle	Critérios de qualidade de energia			
	PG,MAX (kW)	PG,MIN (kW)	MPD (kWh)	APD (kWh)
Perfil de Potência (P_{liquid})	3,45	-5,9	47538,98	1701,09
Simples	0,9182	-2,705	32460,00	29,75
Fuzzy	1,1286	-1,8739	5378,89	19,65
Ganhos do fuzzy sobre o Simples(%)	-	30,72	83,42	33,94

A Tabela 2 mostra que o controlador *fuzzy* consegue melhorar em relação ao controlador simples em quase todos os critérios. Os ganhos de 83,42% em *MPD* e 33,94% em *APD* demonstram que as trocas com a rede elétrica do controlador *fuzzy* são menos abruptas que o controle simples e se mantém por mais tempo suave durante toda a série temporal. Esse comportamento do controlador *fuzzy* é melhor visualizado na Figura 4 onde acontece a comparação da variável P_{liquid} com os resultados dos controladores da simulação.

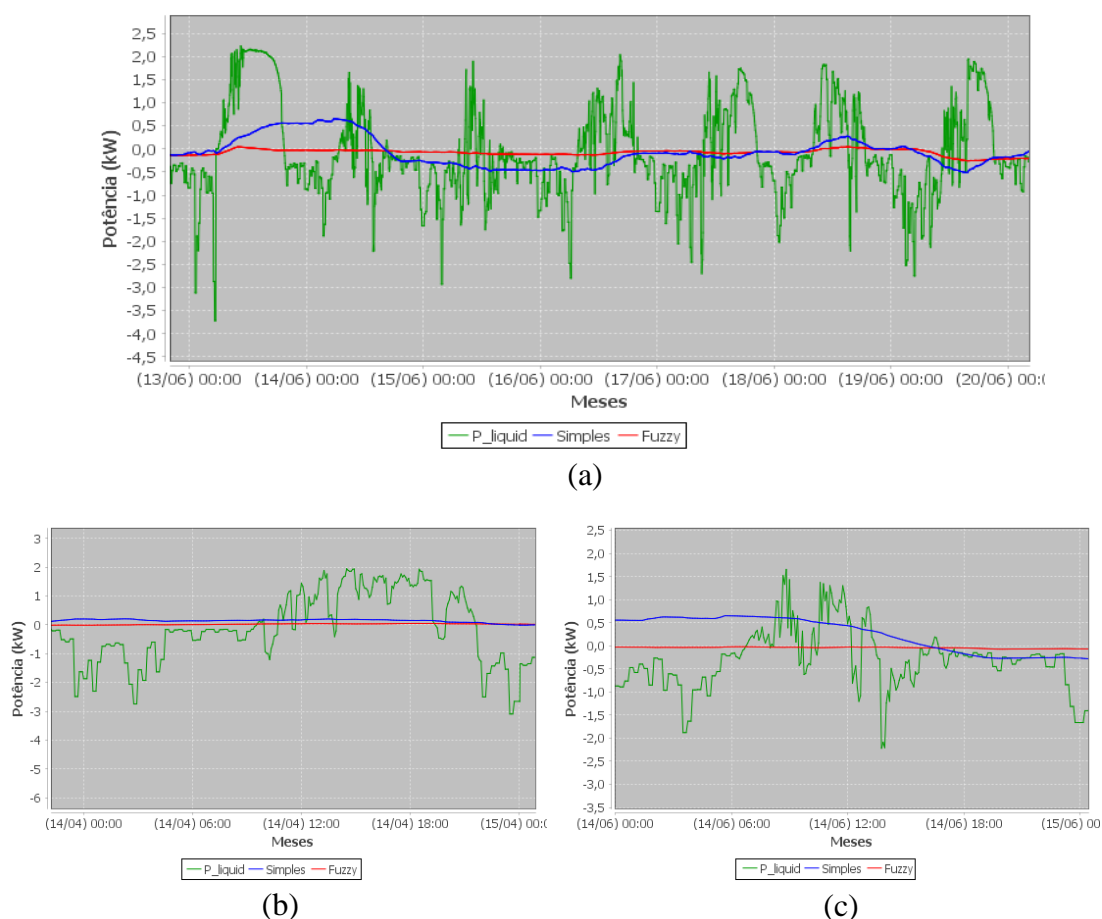


Figura 4. Perfil de troca com a rede no (a) intervalo de 13/06 a 20/06 e os dias (b) 14/04 e (c) 14/06.

A bateria é um item importante para o proprietário da residência porque seu uso eficiente e adequado prolonga a vida útil desse dispositivo. O histórico de armazenagem de energia na bateria durante o período de tempo proposto pela simulação é apresentado

na Figura 5. Ambas as propostas mantêm o nível de energia dentro de limites seguros para assegurar maior vida útil da bateria, mas observa-se que o controlador *fuzzy* utiliza melhor a capacidade da mesma. Os ganhos obtidos na Tabela 2 pela proposta *fuzzy* se deve à utilização mais eficiente da bateria que por sua vez foi possível graças à tomada de decisão *fuzzy*.

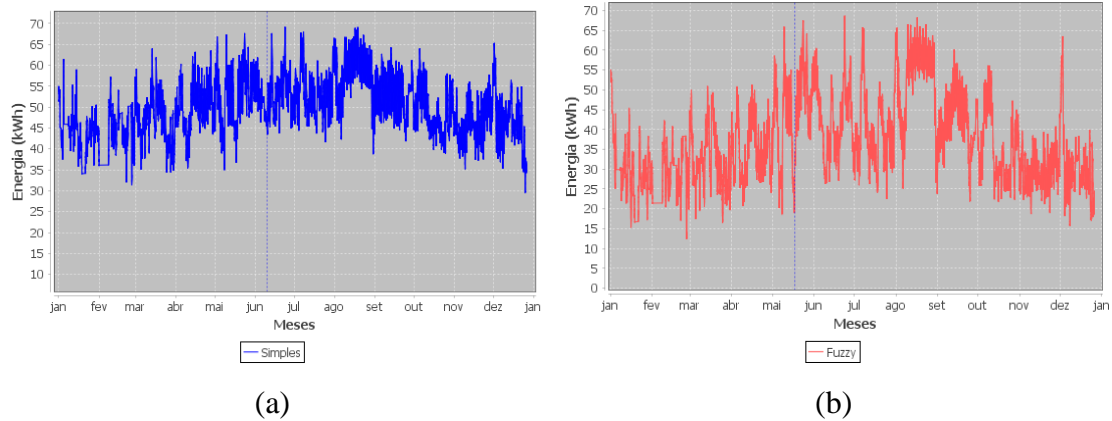


Figura 5. Evolução de energia na bateria do (a) controlador Simples e do (b) controlador *fuzzy*.

5 Conclusão

O estudo propôs um sistema controlador de energia para sistemas fotovoltaicos baseado em lógica *fuzzy* com a finalidade de suavizar o perfil de potência trocado com a rede elétrica. A simulação comparativa atestou os ganhos de suavização nas trocas com a rede por parte do controlador *fuzzy*, o que contribuiu para qualidade de energia da rede facilitando o trabalho das companhias de distribuição de energias. Importante ressaltar que a proposta *fuzzy* utilizou melhor a capacidade da bateria do que a proposta mais simples sem infringir as restrições de segurança (descarregamento total e carregamento total).

Como proposta de trabalhos futuros pode-se citar a realização de experimento real que comprove os resultados obtidos, simulação para quantificar o impacto de um conjunto desses sistemas controladores *fuzzy* em uma rede de distribuição e verificar se outras técnicas de inteligência computacional conseguem melhorar os resultados já obtidos.

Referências

- Avilés, D. A. et al. (2012) “Battery management *fuzzy* control for a grid tied microgrid with renewable generation”, Proc. IECON 38th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Montreal, QC, Canada.
- Arcos-Aviles, D.; Espinosa, N.; Guinjoan, F.; Marroyo, L. and Sanchis, P. (2014) “Improved *fuzzy* controller design for battery energy management in a grid connected microgrid”, Proc. IECON 40th IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. Soc., Dallas, TX, USA.
- Avilés, D. A. et al. (2018) “*Fuzzy* Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids”, In: *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, No. 2.
- AnuphaPharadorn, S.; Sukchai, S.; Sirisamphanwong, C. and Ketjoy, N. (2013) “Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application”, In: *Energy Procedia*, vol. 56, P. 352–358.

- IEEE-PES-ISS (2018) "Open Data Sets", <http://sites.ieee.org/pes-iss/data-sets/>, Janeiro.
- Boyle, B. (2012), Renewable Energy: Power For A Sustainable Future, Ed. 3. Oxford press, Oxford.
- Bastos, R. F. (2013) "Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída", São Carlos, pág 115, Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, USP.
- Barr, J. and Majumder, R. (2015) "Integration Of Distributed Generation In The Volt/Var Management System for Activedistribution Networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2.
- Simões, M. G. and Shaw, I. S. (2007), Controle e Modelagem *Fuzzy*, Blucher, São Paulo, Brasil.
- Liu, W. et al. (2018) "Reliability Assessment of Power Systems with Photovoltaic Power Stations Based on Intelligent State Space Reduction and Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation", In: Energies, vol. 11, no. 6, p 1431, Basel, Switzerland.
- Cavalcanti, J. H. F. et al. (2012), Lógica *Fuzzy* Aplicada às Engenharias, Câmara do Livro, João Pessoa, Brasil.
- Barros, N. J. P. O. (2011) "Análise Do Impacto da Integração de Energias Renováveis em Redes Distribuição", Porto, 146p, Dissertação de Mestrado- Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia, Universidade do Porto.
- Jenkins, N.; Ekanayake, J.B. and Strbac, G. (2010), Distributed Generation, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom.
- Bollen, M. and Hassan, F. (2011), Integration of Distributed Generation in the Power System, IEEE press, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Neosolar (2019) "Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e seus Componentes", <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>, Fevereiro.