DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2273

Design and performance evaluation of conventional and fuzzy MPPT controllers for PV systems

Vinnicius S.G. Pinto, Julia O. Botelho, Thiago A. do Brasil, João A. Moor, Mauro S. Reis.

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, Brasil (Tel: 21 25663022; e-mail: vinniciusgp@gmail.com;julia.obotelho@gmail.com;thiago.brasil@cefet-rj.br;jamoor.neto@gmail.com;mauro.reis@cefet-rj.br)

Abstract: Power generation from photovoltaic arrays is conditioned to the environmental conditions in which they are present. The rate of energy production, therefore, may vary widely depending on the region where the facilities are located. The concept of smart inverter is being presented today as an alternative to the conventional converters connected to the distribution grid, commonly used in mini and micro photovoltaic solar generating units. From the aspect of solar energy penetration in the distribution grid, smart inverters generally use Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms whose function is to always provide the maximum power available in photovoltaic arrays. Therefore, this paper presents a comparison between the MPPT methods most described in the literature, proposing at the end an alternative using Fuzzy Sets.

Resumo: A geração de energia a partir de arranjos fotovoltaicos é condicionada às condições ambientais em que esses estão presentes. A taxa de produção de energia, portanto, pode apresentar grandes variações dependendo da região onde se encontram as instalações. Tem-se discutido atualmente o conceito de smart inverter como uma alternativa ao controle convencional dos conversores conectados à rede de distribuição, comumente empregados nas mini e microunidades geradoras de energia solar fotovoltaica. Do ponto de vista da penetração da energia solar na rede de distribuição, os smart inverters geralmente dispõem de algoritmos de MPPT (Maximum Power Point Tracking), cuja função é fornecer sempre a máxima potência disponível nos arranjos fotovoltaicos. Portanto, este trabalho apresenta uma comparação entre os métodos de MPPT mais descritos na literatura, propondo ao final uma alternativa a partir do uso de Fuzzy Sets.

Palavras-chaves: fuzzy; perturba e observa; condutância incremental; beta; MPPT; smart inverter; energia solar

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta, cada vez mais, uma nova perspectiva de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Em 2018, o percentual da matriz energética respectivo às energias renováveis foi de 22,1%, sendo projetado um aumento para 23,4% em 2023 (ONS, 2019). Segundo o Plano de Operação Energética 2019-2023, do Operador Nacional do Sistema Elétrico, as duas fontes de energias renováveis mais representativas em potência instalada, presentes no país, são a eólica e a solar (ONS, 2019).

Em se tratando da energia solar fotovoltaica, com 1780 MW instalados em 2018 (1,1% da matriz energética brasileira), prevê-se para os próximos 4 anos, um crescimento de quase 100% em sua capacidade instalada. Deste modo, a geração solar fotovoltaica passa a representar 2% da matriz energética brasileira (3636 MW instalados) em 2023, como pode ser observado na Fig. 1 (ONS, 2019).

É importante destacar, dentro desses 1,1%, a presença de 1 GW de energia proveniente da Geração Distribuída, sendo a energia solar fotovoltaica a principal fonte renovável no tocante a mini e microgeração, com 870MW instalados (AID, 2019). A ANEEL caracteriza a mini e a microgeração de energia como a "produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras" (ANEEL, 2016).

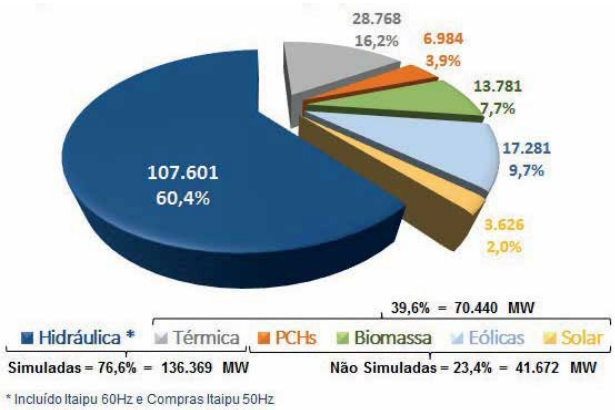

Fig. 1 Capacidade Instalada SIN 2023 - PEN 2019.

A penetração de energia solar através dos painéis fotovoltaicos não acontece de forma constante. Dependendo da região onde os painéis sejam instalados, os horários de máxima geração de

potência podem variar; ocorrendo, em geral, por volta do meio dia. Sabe-se também que, durante o período noturno, praticamente não há qualquer geração de energia proveniente de arranjos fotovoltaicos.

A energia solar captada durante os períodos diurnos é convertida em energia elétrica na forma de corrente contínua (Anabuki, 2015). Normalmente, durante os períodos noturnos ou de menores índices de irradiação solar, a produção de energia é drasticamente reduzida, sendo esta intermitência energética uma característica preponderante deste tipo de geração.

Deste questionamento, surge o conceito de conversores inteligentes ("Smart Inverters"). Estes equipamentos oferecem novas aplicações que fornecem à rede de distribuição reforços que possibilitam a melhor inserção de fontes renováveis de energia no sistema (Varma, Khadkikar and Seethapathy, 2009; Anabuki, 2015; Siavashi, 2015; Varma, Rahman and Vanderheide, 2015).

Neste contexto, é de extrema importância que a produção de energia seja maximizada em todos os momentos possíveis, o que exige a utilização de algoritmos de MPPT (Maximum Power Point Tracking), possibilitando que o arranjo fotovoltaico converta sempre o máximo de energia, de acordo com as condições de irradiação e temperatura em que se encontre submetido (Satish, Srinivas and Sreeraj, 2016).

Este trabalho tem como premissa, portanto, avaliar e comparar os mais relevantes algoritmos de MPPT apresentados na literatura (De Brito *et al.*, 2010; Lobato, 2015; Silva, 2015; Satish, Srinivas and Sreeraj, 2016; Silva *et al.*, 2017; Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018). Além disto, é proposto um algoritmo de MPPT diferenciado, tendo sua lógica balizada por *fuzzy sets* (Brasil, 2013; Bendib *et al.*, 2014; Venkateshkumar, 2016; Algarín, Giraldo and Álvarez, 2017; Reddy and Ramasamy, 2018; Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018). Ao final, será possível avaliar a performance e robustez a partir dos quesitos velocidade de resposta e rendimento de cada um destes algoritmos.

2. CARACTERÍSTICAS DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A geração de energia solar fotovoltaica é realizada a partir de painéis compostos por células dispostas em arranjos do tipo série e paralelo. A produção de corrente elétrica acontece quando o material semicondutor (de junção pn) é bombardeado por fótons, presentes na radiação solar (Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018).

Considerando o modelo básico de uma célula fotovoltaica (De Brito et al., 2010), pode-se representá-la por uma fonte de corrente (I_{fv}), a qual está associada ao nível de irradiação solar; um diodo, representando a junção pn e, finalmente, um conjunto de resistência série (R_s) e shunt (R_{sh}), os quais compõem as resistências intrínsecas da célula (Messalti, Harrag and Loukriz, 2015), como analisado na Fig. 2 (De Brito et al., 2010).

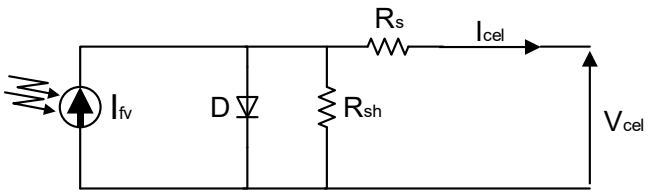

Fig. 2 Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A relação entre a corrente gerada na célula fotovoltaica (I_{cel}) e os níveis de irradiação solar e temperatura, às quais o arranjo fotovoltaico é submetido, é dada por (1) (Algarín, Giraldo and Álvarez, 2017; Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018):

$$I_{cel} = I_{fv} - I_0\left[\exp\left(q\left(V_{cel} - I_{cel}R_S\right)\Big/AkTa\right) - 1\right] - \left(V_{cel} - I_{cel}R_S\right)\Big/R_{Sh} \quad (1)$$

onde I_{cel} é a corrente total gerada pela célula fotovoltaica (Ampères), I_{fv} é a fotocorrente gerada pelo material semicondutor fotossensível (Ampères), I_0 é a corrente de saturação do diodo (Ampères); V_{cel} é a tensão de saída da célula fotovoltaica (Volts); R_s é a resistência em série (Ohms); R_{sh} é a resistência shunt da célula (Ohms); A é o fator de idealidade do diodo; k é a constante de Boltzman (J/K); q é a carga do elétron e T_a é a temperatura de junção da célula fotovoltaica (Kelvin).

Portanto, como verificado em (1) , os sistemas fotovoltaicos tornam-se dependentes principalmente da temperatura ambiente e nível de irradiação solar presentes no local de instalação. Sendo assim, os níveis de tensão e corrente dos painéis e, consequentemente, da potência entregue a rede, variam de acordo com esses fatores. A Fig. 3 apresenta a dependência da tensão e corrente geradas em um arranjo com 25 painéis em paralelo e 10 em série, todos do tipo Soltech 1STH-215-P.

Analisando o gráfico PxV, considerando-se a temperatura de 25° C como constante (Fig. 3a), observa-se que a tensão de ocorrência do MPP (Maximum Power Point – Ponto de Máxima Potência) é praticamente a mesma independentemente do nível de irradiação sobre o qual o arranjo é submetido. O mesmo, porém, não se pode afirmar sobre o gráfico PxV na Fig. 3b, onde a ocorrência do MPP, considerando-se um índice de irradiação solar afixado em 1 kW/m^2, para uma temperatura de 45°C, por exemplo, se dá em níveis inferiores de tensão.

Percebe-se, portanto, a necessidade do controle da tensão V_{cel} do arranjo de painéis a terem conexão com a rede. Estes algoritmos são conhecidos como MPPT, responsáveis por proporcionar um balanço entre a relação de tensão (V_{cel}) e corrente (I_{cel}), de forma a encontrar-se o mais próximo possível do MPP.

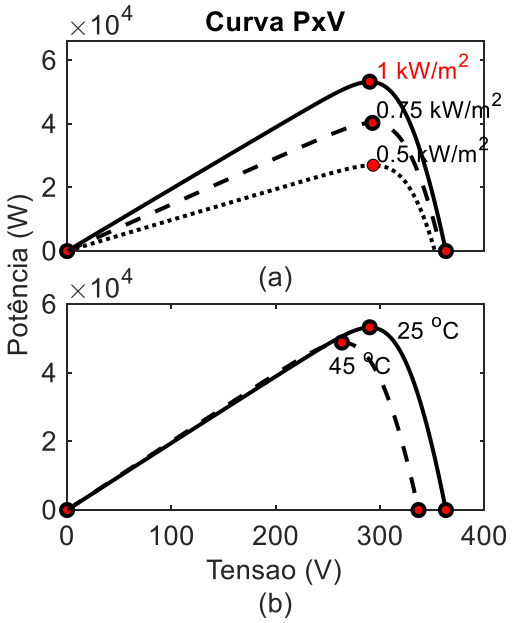

Fig. 3 Gráficos PxV: (a) temperatura constante e níveis de irradiação especificados; (b) nível de irradiação constante e temperaturas especificadas.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para avaliar a performance dos algoritmos MPPT estudados neste trabalho, foi implementado, no software MATLAB – SIMULINK, um sistema simplificado *off-grid*, composto por um conversor *boost* e uma carga resistiva, de forma que haja o menor impacto possível do sistema no desempenho dos algoritmos em análise. O sistema de estudo pode ser observado na Fig. 4.

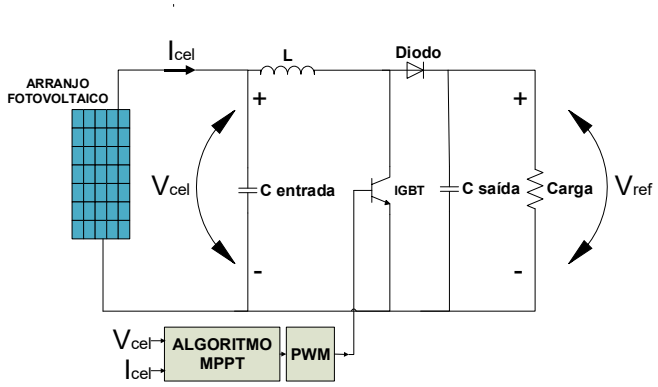

Fig. 4 Topologia do sistema em estudo.

4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Nesta seção são apresentados os algoritmos de MPPT analisados neste trabalho, sendo eles: Perturba e Observa, Condutância Incremental, Beta e a proposta de MPPT com uso da lógica *fuzzy*.

4.1 Perturba e Observa (P&O)

O método Perturba e Observa, como o próprio nome sugere, é caracterizado por realizar perturbações no sistema a partir da variação no ciclo de trabalho D do conversor *boost*, observando, então, a consequente oscilação na potência gerada pelo arranjo de painéis. Trata-se de um técnica amplamente utilizada, pois apresenta fácil implementação (Silva et al., 2017).

A partir da Fig. 5 é possível observar que o acréscimo da tensão provoca uma variação da potência gerada. Comparando-se a potência gerada com o valor obtido na iteração anterior, pode-se operar da seguinte forma: caso a variação de potência gerada seja positiva, a perturbação no ciclo de trabalho do conversor *boost* mantém-se na direção deste gradiente. Do contrário, a perturbação se dá na direção oposta (Lobato, 2015; Silva et al., 2017).

Destaca-se, portanto, uma característica do método Perturba e Observa: o valor da perturbação sobre a tensão deve ser o suficiente para atingir o MPP com rapidez, mas também, manter a estabilidade do sistema perante rápidas variações em seus parâmetros de entrada (temperatura e nível de irradiação) (Lobato, 2015; Silva et al., 2017).

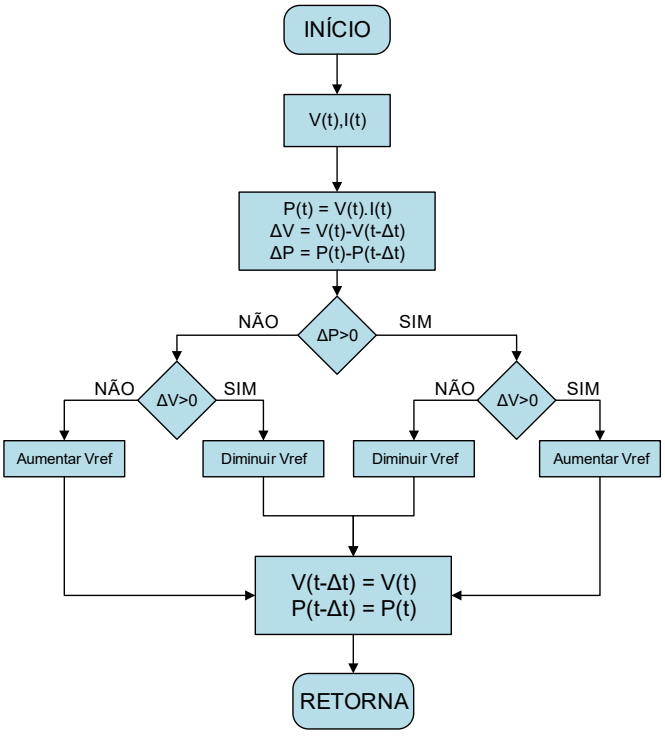

Fig. 5 Fluxograma Método P&O.

4.2 Condutância Incremental

O método da Condutância Incremental, analogamente ao método de Perturba e Observa, se trata de um algoritmo heurístico, que se baseia no conceito de interferir no sistema e analisar a resposta à essa interferência. A partir de suas variáveis de entrada, tensão (V) e corrente (I), realiza-se a análise instantânea da derivada ao longo da curva PxV do arranjo fotovoltaico. Definindo os incrementos diferenciais de corrente e tensão dI e dV, respectivamente, como sendo a diferença entre os valores atuais da iteração do algoritmo e os valores imediatamente anteriores, é possível gerar as relações utilizadas pelo método para tomada de decisão quanto ao

acréscimo, decréscimo ou constância da perturbação ao sistema (Lobato, 2015; Silva et al., 2017), (De Brito et al., 2010). Observa-se na Fig. 6 as relações de tomada de decisão e na Fig. 7 o fluxograma geral do método.

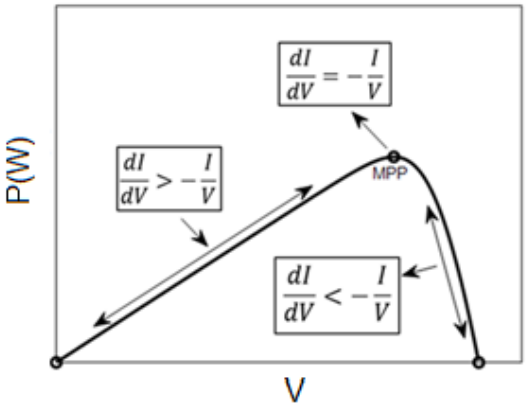

Fig. 6 Algoritmo básico do método Condutância Incremental.

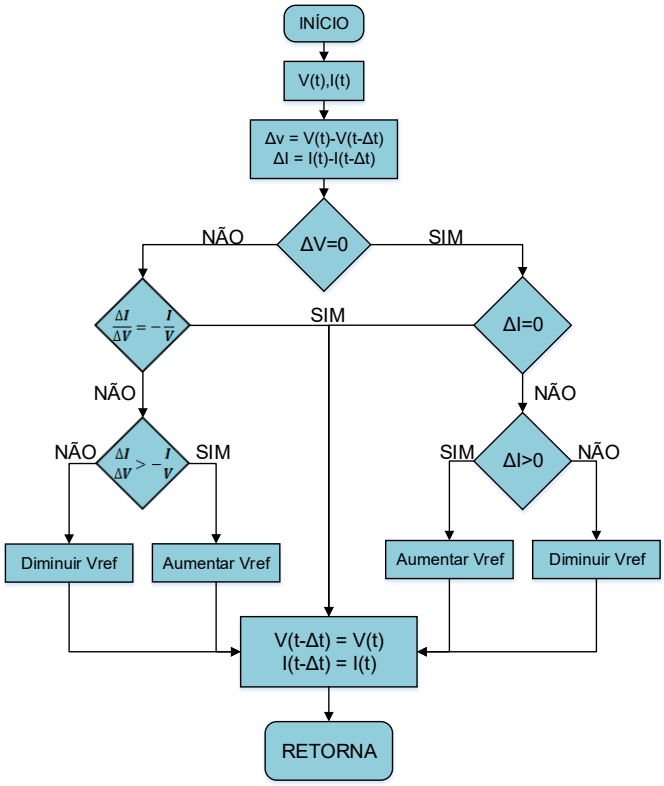

Fig. 7 Fluxograma do método Condutância Incremental.

4.3 Beta

O método Beta de MPPT caracteriza-se pela utilização de uma variável (Beta – β), visando a aproximação do valor de máxima potência (De Brito et al., 2010). As variáveis de tensão e corrente do arranjo fotovoltaico são utilizadas no cálculo de beta da seguinte forma (De Brito *et al.*, 2010; Silva, 2015; Silva *et al.*, 2017; Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018):

$$\beta = \ln\left(I_{fv}/V_{fv}\right) - CV_{fv} \tag{2}$$

$$C = q/\eta_{cel} KTN_{cel} \tag{3}$$

onde, η_{cel} é a eficiência das células fotovoltaicas, K é a constante de Boltzman, T é a temperatura da célula em Kelvin, N_{cel} é a quantidade de células fotovoltaicas em série, q é a carga do elétron, I_{fv} corrente do arranjo fotovoltaico e V_{fv} é a tensão do arranjo fotovoltaico (De Brito *et al.*, 2010; Silva, 2015; Silva *et al.*, 2017; Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018).

Este método não possui a capacidade de auto estabilizar-se no MPP, sendo necessária, portanto, uma alteração em seu controle (Silva, 2015). Deste modo, configuram-se dois valores de beta, βmin e βmax, os quais são utilizados como base para comparação com a variável βa de cada iteração. Na condição de βa assumir um valor entre βmin e βmax, o método permuta-se para outro algoritmo, geralmente o P&O. Seu fluxograma é apresentado na Fig. 8.

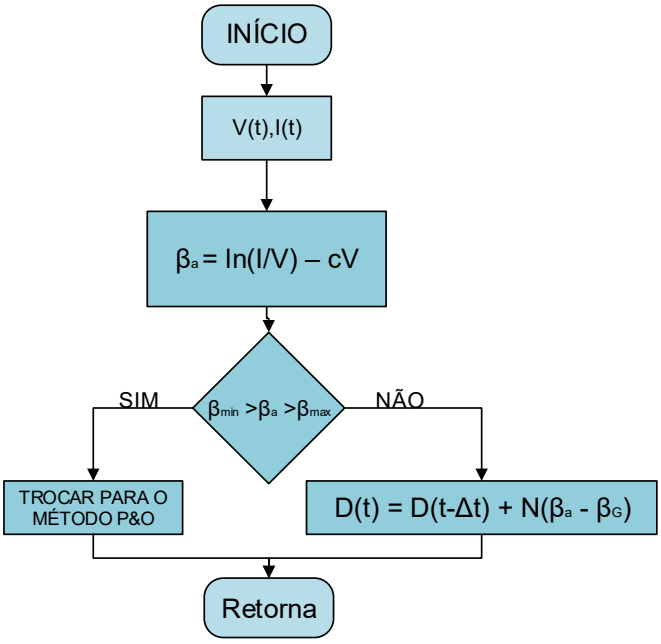

Fig. 8 Fluxograma do método Beta.

4.4 Controle Fuzzy

O controlador *fuzzy* apresenta como vantagem em relação aos demais métodos a característica adaptativa (Reddy and Ramasamy, 2018). Sendo assim, seu algoritmo pode alternar a magnitude de sua resposta dependendo do grau de relevância das variáveis de entrada, o que lhe concede um aspecto dedutivo (Brasil, 2013). Este processo se dá pela lógica de pertinência a um ou mais conjuntos que um número possui; ao contrário da lógica matemática convencional onde um número pertence ou não a um conjunto (Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018).

Assim como nos outros métodos, as variáveis de entrada utilizadas foram ΔV e ΔP. Portanto, a cada aquisição destas variáveis, o algoritmo é capaz de, a partir das regras pré-definidas, ponderar uma saída de controle correspondente. O controlador MPPT *fuzzy* proposto neste trabalho é composto por três estruturas básicas:

Fuzzificação: Neste processo, as variáveis de entrada são transformadas em variáveis *fuzzy*, compreendidas em funções de pertinência com representatividade em termos linguísticos, tais como negativo pequeno, zero, positivo grande etc (Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018). Além disto, as funções de pertinência podem possuir diferentes formatos, como triangular, sigmoide e trapezoidal (Reddy and Ramasamy, 2018). Neste trabalho foram definidas 5 funções triangulares (Negativo Médio e Pequeno, Zero e Positivo Pequeno e Médio) e 2 trapezoidais (Negativo Grande e Positivo Grande), para cada uma das variáveis ΔV e ΔP.

Máquina de inferências: Composta pela tabela de regras, a máquina de inferências tem por objetivo interpretar os valores das variáveis linguísticas de entrada. Este processo ocorre a partir das regras de formato SE-ENTÃO, com respostas exatas para condições exatas (Reddy and Ramasamy, 2018). Para a criação da tabela de regras, utilizou-se como base o comportamento da curva PxV, o qual é praticamente idêntico independentemente do tipo de arranjo fotovoltaico em questão, se forem desconsideradas as perdas por sombreamento. Analisando a Fig. 9, é possível observar quatro regiões de comportamento distintas, as quais são parametrizadas na tabela de regras como apresentado na Tabela 1.

Defuzzificação: A partir das respostas encontradas na Máquina de Inferências, é necessário que haja uma interpretação da pertinência destas respostas. Portanto, utilizou-se o método de Mandami, que se baseia na composição máximo-mínimo, apresentando um sistema de inferências mais intuitivo e de fácil implementação através da experiência do operador, quando comparado ao Takagi-Sugeno, por exemplo (Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, 2018). Desta forma, o processo de defuzzificação fornece a resposta às variáveis iniciais, ou seja, a perturbação no ciclo de trabalho do conversor *boost*. A superfície de controle que representa a relação entradas-saída não linear entre ΔV e ΔP e a saída do controlador (Δduty) é apresentada na Fig. 10. Na Fig. 11 apresenta-se o fluxograma base do controlador MPPT Fuzzy.

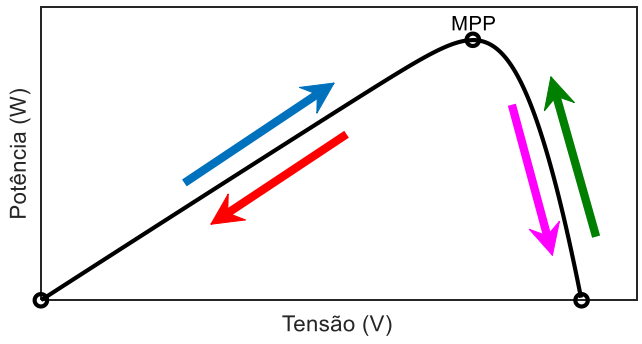

Fig. 9 Curva PxV base para criação da tabela de regras.

Tabela 1 Tabela de regras *fuzzy*.

DELTA		POTÊNCIA (P)						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
TENSÃO (V)	PB	ZE	ZE	NM	NB	NB	NB	NB
	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
	PS	PS	ZE	NM	NS	NS	NM	NB
	ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
	NS	PS	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
	NM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
	NB	PS	PS	PM	PB	NM	ZE	PB

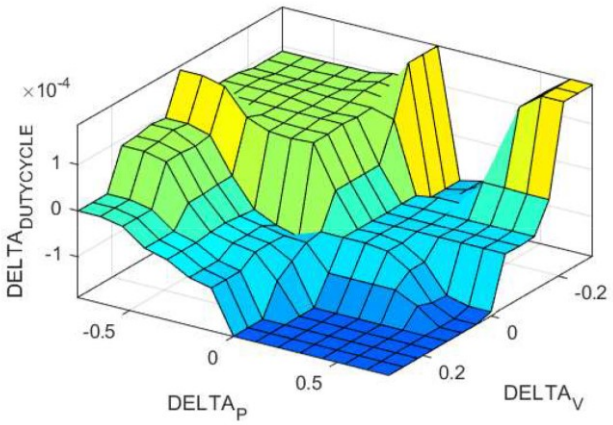

Fig. 10 Superfície de regras *fuzzy*.

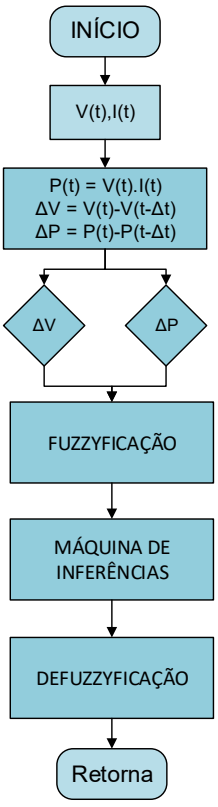

Fig. 11 Fluxograma base do controlador MPPT *Fuzzy*.

5. METODOLOGIA

Para avaliar a performance dos métodos de MPPT, foram definidos 7 casos distintos, baseando-se na metodologia proposta por Jain et al. (Jain, Kriti; Gupta, Manju; Kumar Bohre, Aashish, 2018). A Tabela 2 apresenta os 7 casos simulados, considerando-se variações na temperatura e nível de irradiação solar do arranjo em questão, além de sua potência esperada (MPP de cada etapa) a ser gerada, tal como representado na Fig. 12.

Tabela 2 Valores de irradiação e temperatura das etapas de simulação.

ETAPA	IRRADIAÇÃO (W/m^2)	TEMPERATURA (°C)	POTÊNCIA TEÓRICA (W)
A	1000	25	$5.329x10^4$
B	750	25	$4.033 x10^4$
C	500	25	$2.7 x10^4$
D	1000	25	$5.329 x10^4$
E	1000	45	$4.884 x10^4$
F	1000	35	$5.106 x10^4$
G	1000	25	$5.329 x10^4$

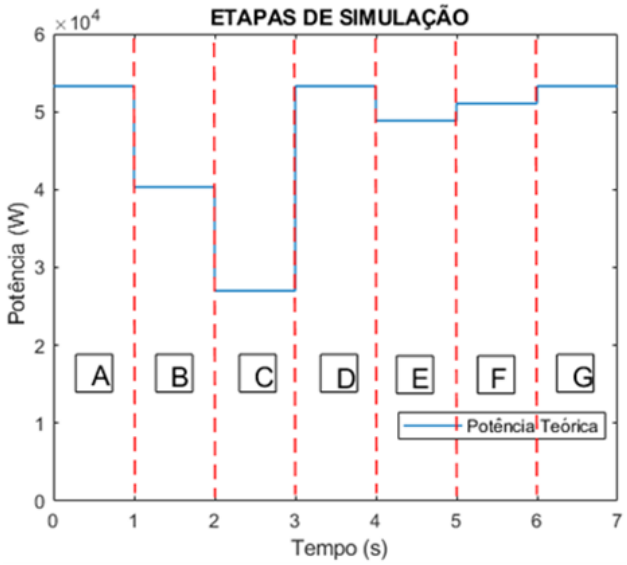

Fig. 12 Etapas de simulação.

Para cada etapa, os métodos foram avaliados quanto:

Tempo de acomodação (TA): tempo necessário para que a potência gerada alcance os níveis dentro da margem de acomodação, sendo esta definida por ±1.5% da potência teórica (MPP) do arranjo fotovoltaico sob as condições em questão.

Rendimento (REND): A relação entre a potência teórica do arranjo fotovoltaico de cada etapa de simulação e a real potência gerada pelo método.

Na Fig. 13 é possível observar a representação genérica de uma curva gerada por um método de MPPT e as margens inferior e superior de acomodação, bem como a reta de potência teórica de referência que o arranjo seria capaz de produzir e as medições relativas às variáveis de controle.

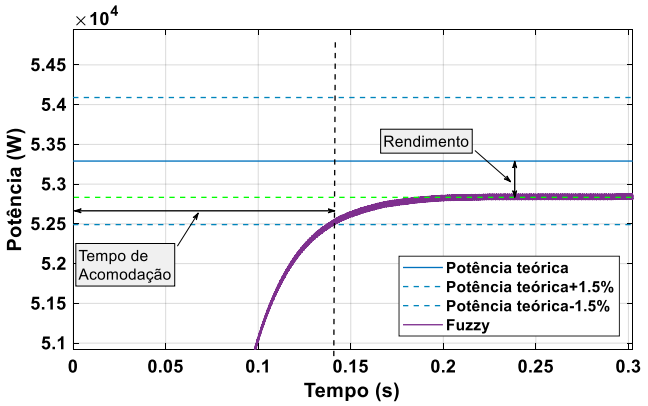

Fig. 13 Representação genérica da curva de um MPPT e da potência teórica com as margens de acomodação.

6. RESULTADOS

A Fig. 14 apresenta os perfis de potência gerada por cada método durante a etapa A de simulação. Como é possível verificar, a resposta do MPPT Fuzzy foi nitidamente mais rápida do que a dos demais algoritmos. Para as etapas seguintes de variação nos parâmetros temperatura e irradiação solar, os resultados apresentaram performance praticamente idêntica ao demonstrado na Fig. 14, sendo resumidos a partir da Tabela 3. Finalmente, a Tabela 4 apresenta os valores médios de tempo de acomodação e rendimento para cada um dos algoritmos descritos neste trabalho.

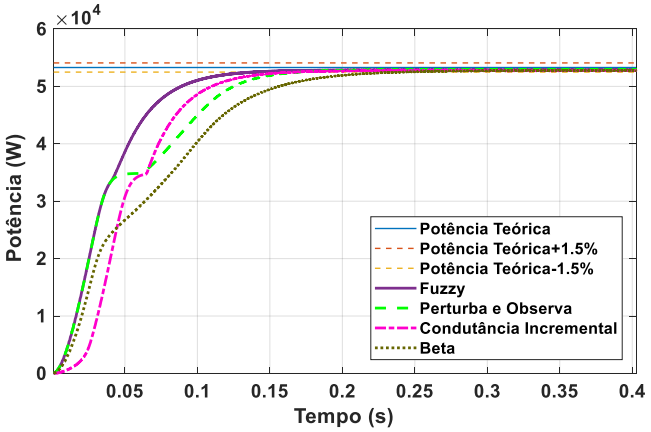

Fig. 14 Resposta transitória dos MPPTs durante etapa A de simulação.

Outra diferença primordial no algoritmo MPPT Fuzzy proposto é referente a sua resposta em regime permanente. É possível observar a partir da Fig. 15 a diferença de comportamento do método P&O, por exemplo, e o baseado em lógica Fuzzy após suas respectivas estabilizações, durante a etapa C de simulação. Nota-se que o uso do método P&O acarreta uma oscilação permanente de potência em torno do MPP, enquanto o algoritmo baseado em lógica Fuzzy é capaz de estabilizar-se em um valor fixo. Em um sistema real, esta oscilação contínua em torno do MPP pode ocasionar um aumento nas perdas por chaveamento do conversor *boost*.

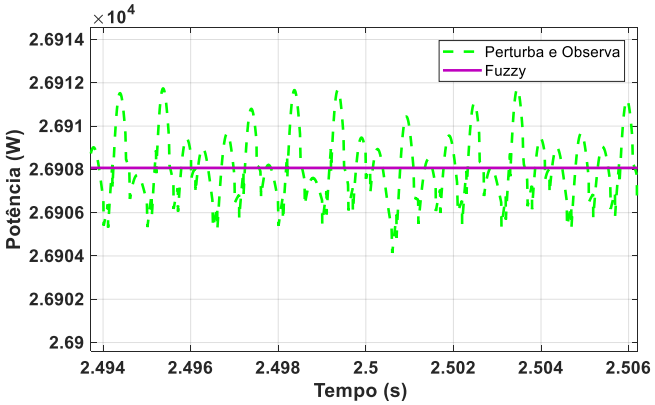

Fig. 15 Resposta em regime permanente dos MPPTs Perturba e Observa e Fuzzy durante a Etapa C de simulação.

Tabela 3 Resultados de Simulação

RESULTADOS				
ETAPA	MPPT	T.A. (s)	P.G. (Wx10^4)	Rendimento
A	FUZZY	0.141	5.285	99.174%
	P&O	0.172	5.294	99.343%
	CI	0.171	5.274	98.968%
	BETA	0.246	5.278	99.043%
B	FUZZY	0.064	4.004	99.281%
	P&O	0.108	4.014	99.529%
	CI	0.061	3.997	99.107%
	BETA	0.098	4.005	99.306%
C	FUZZY	0.0756	2.691	99.667%
	P&O	0.0782	2.691	99.667%
	CI	0.070	2.684	99.407%
	BETA	0.118	2.685	99.444%
D	FUZZY	0.106	5.285	99.174%
	P&O	0.113	5.295	99.362%
	CI	0.114	5.275	98.987%
	BETA	0.174	5.278	99.043%
E	FUZZY	0.033	4.847	99.242%
	P&O	0.031	4.854	99.386%
	CI	0.032	4.842	99.140%
	BETA	0.046	4.841	99.120%
F	FUZZY	0.044	5.068	99.256%
	P&O	0.039	5.076	99.412%
	CI	0.050	5.060	99.099%
	BETA	0.075	5.062	99.138%
G	FUZZY	0.046	5.285	99.174%
	P&O	0.041	5.295	99.362%
	CI	0.055	5.275	98.987%
	BETA	0.079	5.278	99.043%

Tabela 4 Resultados Médios

RESULTADOS MÉDIOS		
MPPT	MÉDIA TA	MÉDIA REND
FUZZY	0,073	99,251%
P&O	0,083	99,416%
CI	0,079	99,074%
BETA	0,119	99,135%

7. CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos acima, observa-se que todos os métodos apresentaram rendimento de aproximadamente 99%, portanto, tal variável torna-se irrelevante do ponto de vista de análise de desempenho. Já os tempos de acomodação podem ser interpretados como variáveis de desempenho. Ademais, cada método apresentou um tempo de acomodação médio, sendo a diferença entre os mesmos significativa.

O método Beta demonstrou ser o mais lento dentre os quatro métodos estudados, com um tempo de acomodação médio de 0.119s. Logo após, o método Perturba e Observa apresentou 0.083s de tempo de acomodação, uma melhoria de 30.25% em comparação ao Beta. Finalmente, os métodos mais rápidos foram o MPPT Fuzzy e o Condutância Incremental, com 0.073s e 0.079s, respectivamente. Sendo assim, o MPPT Fuzzy apresentou um tempo médio de resposta 7.59% menor que o Condutância Incremental. Este resultado demonstra que a utilização da lógica fuzzy foi efetiva no controle MPPT de um arranjo fotovoltaico, podendo o mesmo ser implementado também em aplicações do tipo *grid tie*, o que confere maior robustez, velocidade e eficiência do que os métodos MPPT atualmente utilizados junto a inversores fonte de tensão de usinas fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS

AID (2019) *Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída Regulamentos da Agência possibilitaram avanço da geração distribuída*. Available at: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/zXQREz8EVlZ6/content/id/18723889 (Accessed: 28 November 2019).

Algarín, C. R., Giraldo, J. T. and Álvarez, O. R. (2017) 'Fuzzy logic based MPPT controller for a PV system', *Energies*, 10(12). doi: 10.3390/en10122036.

Anabuki, E. T. (2015) *SISTEMA FOTOVOLTAICO COM FUNÇÃO AUXILIAR DE REGULAÇÃO DE TENSÃO*. Rio de Janeiro. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

ANEEL (2016) 'Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 2 - Planejamento', *Cadernos Temáticos ANEEL*, p. 34. Available at: http://www.aneel.gov.br/modulo-2.

Bendib, B.,Krim, F.,Belmili, H.,Almi, M. F.,Boulouma, S. (2014) 'Advanced fuzzy MPPT controller for a stand-alone PV system', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 50, pp. 383–392. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.046.

Brasil, T. A. do (2013) *MODELAGEM MATEMÁTICA DE ALGORITMOS PHASE-LOCKED LOOP BASEADOS EM CONTROLADORES PROPORCIONAIS INTEGRAIS E PROPOSTA DE UM NOVO ALGORITMO BASEADO EM ESTRATÉGIA FUZZY*. Rio de janeiro.

De Brito, M. A. G. *et al.* (2010) 'Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos', *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2010*. doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5740002.

Lobato, S. de C. (2015) *Análise Comparativa entre as Principais Técnicas de MPPT com Foco Experimental*. Juiz de Fora.

Messalti, S., Harrag, A. G. and Loukriz, A. E. (2015) 'A new neural networks MPPT controller for PV systems', *2015 6th International Renewable Energy Congress, IREC 2015*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/IREC.2015.7110907.

ONS (2019) *Plano de Operação Energética 2019-2023*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Reddy, D. and Ramasamy, S. (2018) 'A fuzzy logic MPPT controller based three phase grid-tied solar PV system with improved CPI voltage', *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2017*, 2017-Janua, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPACT.2017.8244953.

Satish, R., Srinivas, C. L. S. and Sreeraj, E. S. (2016) 'A Maximum Power Point Tracking Technique Based on Ripple Correlation Control for Single-Phase Single-Stage Grid Connected Photovoltaic System', *5th International Conference on Advances in Energy Research, ICAER 2015, 15-17 December 2015, Mumbai, India*.

Siavashi, E. M. (2015) *Smart PV Inverter Control for Distribution Systems*. London, Ontario, Canada.

Silva, L. R. C. (2015) *Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Uberlândia.

Silva, L. R. C., Guimarães, G. C., Monteiro, R. V. A., Tamashiro, M. A., Cunha, G. H. B., Oliveira, T. L., Santos, R. R. (2017) 'Análise Computacional de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos Fotovoltaicos', *Revista Brasileira de Energia Solar*, 8(1), pp. 26–33. Available at: https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/171.

Sousa, Silas; Rodrigues, Giovani; Luz, Caio; Pereira, H. (2018) 'ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE MPPT BASEADAS EM CONTROLADOR FUZZY E O ALGORITMO BETA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSOR CC-CC SEPIC', *CBA*. Belo Horizonte. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Varma, R. K., Khadkikar, V. and Seethapathy, R. (2009) 'Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(4), pp. 983–985. doi: 10.1109/TEC.2009.2031814.

Varma, R. K., Rahman, S. A. and Vanderheide, T. (2015) 'New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM) for Increasing Grid Power Transmission Limits During Night and Day', *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), pp. 755–763. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2375216.

Venkateshkumar, M. (2016) 'Fuzzy Controller-Based MPPT of PV Power System', *Intech*, i, p. 13. doi: http://dx.doi.org/10.5772/57353.

Jain, Kriti; Gupta, Manju; Kumar Bohre, Aashish (2018) ' Implementation and Comparative Analysis of PO and INC MPPT Method for PV System' , India International Conference on Power Electronics, IICPE, p.1-6. doi: 10.1109/IICPE.2018.8709519

Apêndice A. DADOS DE SIMULAÇÃO

Tabela 5 Dados de simulação.

Componente	Valor
C entrada	120μF
C saída	15mF
L	150μH
Rcarga	3.2Ω
Frequência de Chaveamento	10020Hz
Timestep de simulação	1μs
ΔD (P&O)	0.0005
ΔD (CI)	0.0025
βmin	9.4
βmax	11.6