

ESTUDO DA DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA GERADA POR SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS VIA LÓGICA FUZZY

**LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO¹; CAMILA PIRES CREMASCO²,
FERNANDO FERRARI PUTTI³, ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM⁴, JHONATAM
CABRERA PLAZENTIN⁵**

¹Licenciada em Matemática, Doutora em Agronomia/Energia na Agricultura, Professor Assistente Doutor, UNESP, Tupã - SP, e Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Botucatu - SP. Fone: (0XX14) 3404-4200, camila@tupa.unesp.br.

²Licenciado em Matemática, Doutor em Agronomia/Energia na Agricultura, Professor Assistente Doutor, UNESP, Tupã - SP, e Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Botucatu - SP. Fone: (0XX14) 3404-4200, gabrielfilho@tupa.unesp.br.

³Mestre em Agronomia/Irrigação, Professor Substituto UNESP, Tupã - SP. Fone: (0XX14) 3404-4200, putti@tupa.unesp.br.

⁴ Professor da Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Botucatu - Univ Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho- Botucatu (Rua Doutor José Barbosa de Barros, 1780 - CEP 18610-307, Botucatu - SP), seraphim@fca.unesp.br

⁵ Discente do curso de Matemática, UNESP - Univ Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho- Presidente Prudente

Apresentado no

XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015

13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro- SP, Brasil

RESUMO: As placas solares regem o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos sem levar em consideração as particularidades do material de fabricação do módulo, ou ainda devido aos fatores ambientais locais. Desta forma necessita-se determinar formas de obtenção das curvas de corrente e potência fotovoltaicas, bem como a criação de um modelo matemático ajustado para condições de campo referente ao sistema fotovoltaico localizado na Fazenda Experimental Lageado da FCA/UNESP-Botucatu. Posteriormente, foram realizadas estimativas via lógica fuzzy dos parâmetros das equações da potência e corrente de sistemas solares, uma vez que os níveis de erro do modelo matemático existente podem ser controlados pela lógica fuzzy. Para a concretização de tal objetivo realizou-se um estudo aprofundado sobre a lógica fuzzy bem como o processo de desenvolvimento das equações que regem a potência dos sistemas fotovoltaicos, tendo para isto a corrente, potência máxima e a tensão demonstradas em fontes secundárias. Para isto, foram demonstradas as principais equações para a realização da formulação final afim de aferir o resultado de modo mais preciso, que apresentou um erro de -4,47% de tensão máxima, 7,93% de corrente e 2,97% de potência máxima entre os valores especificados pelo fabricante das placas solares e o modelo matemático proposto. As curvas proporcionam respostas reais para o usuário. Os métodos e teoremas dos sistemas fotovoltaicos apresentados podem servir de auxílio a futuros dimensionamentos para aplicações destes sistemas, uma vez que a potência máxima calculada garante um limite de fornecimento da energia gerada.

PALAVRAS-CHAVE: energia gerada, solar, regras *fuzzy*.

STUDY OF DETERMINATION OF POWER CURVES GENERATED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS VIA FUZZY LOGIC

ABSTRACT: The solar panels governing the operation of photovoltaic systems without taking into account the particularities of the module manufacturing material, or due to local environmental factors. Thus one needs to identify ways of obtaining the photovoltaic current and power curves as well as the creation of a mathematical model adjusted for field conditions regarding the photovoltaic system located at the Experimental Farm Lageado FCA / UNESP-Botucatu. Subsequently, estimates were made via *fuzzy* logic the parameters of power and current equations of solar systems, since the existing mathematical model error levels can be controlled

by fuzzy logic. For the realization of this goal we carried out a thorough study on the fuzzy logic and the development process of the equations that govern the power of photovoltaic systems, and for this the current, maximum power and voltage demonstrated in secondary sources. For this, the main equations have been demonstrated to perform the final formulation in order to assess the result more accurately, which has an error of -4,47% of maximum voltage, current and 7,93% to 2,97% maximum power between the values specified by the manufacturer of the solar panels and the proposed mathematical model. The curves provide real answers to the user. The methods and theorems of our photovoltaic systems may provide assistance to dimensioning for future applications of such systems, since the calculated maximum power limit guarantees a supply of the energy generated.

KEYWORDS: generated, solar, *fuzzy* rules.

INTRODUÇÃO

A energia solar além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (CRESESB, 1999). O Sol é considerado uma fonte de energia inesgotável além de ser renovável e que não polui o meio ambiente. A utilização desta fonte para a geração da energia elétrica representa uma alternativa viável, uma vez que o acesso à energia elétrica convencional é de difícil acesso além de não ser econômica (MACIEL et al., 2008).

Desta forma, a energia solar é uma das formas que pode ser utilizada no aquecimento de água por meio dos coletores termossolares e geração de eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos para iluminação e bombeamento de água atendendo assim essas áreas. (KOLLING et al., 2004). Desta maneira, estudos de sistemas fotovoltaicos de geração de energia são necessários para o máximo aproveitamento colaborando com a implantação de sistemas mais eficientes e com menores custos.

Tecnologias voltadas para a utilização da energia solar será de grande benefício para comunidades rurais isoladas e a áreas remotas, principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, uma vez que há enormes disparidades econômicas e sociais (MARINI e ROSSI 2005). O apelo ambiental é outro fator na expansão do uso da tecnologia fotovoltaica, já que este sistema possui como principal característica a não modificação do equilíbrio térmico da Terra com modo de operação sem emissão de gases de efeito estufa ou de gases ácidos. Isso acarreta a não necessidade de formação de lagos para reservatórios e, além disto, o desmatamento só ocorre em grandes instalações, as quais, muitas vezes são construídas em áreas desérticas ou semi-áridas (ALVES e CAGNON 2010).

De acordo com Castro (2008), as células fotovoltaicas são constituídas por um material semicondutor - o silício - ao qual são adicionadas substâncias, ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência elétrica DC. Além disso, Castro (2008) afirma que a célula é o menor elemento do sistema fotovoltaico, produzindo tipicamente potências elétricas da ordem de 1,5 Wp (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A).

Fraga (2009), módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema. O módulo é composto de células solares conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia. O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada. Uma vez tendo a configuração desejada, o conjunto é encapsulado com material especial que o protege de possíveis danos externos.

O presente estudo teve como objetivo determinar analiticamente formas de obtenção de curvas de corrente e potência fotovoltaicas; expressar genericamente a potência máxima e os

valores de tensão e corrente associados; e criar um modelo matemático ajustado para condições de campo referente aos sistemas fotovoltaicos dos laboratórios da UNESP, Campus de Botucatu e Tupã. Com tais modelos determinados, realizaram-se estimativas via lógica *fuzzy* dos parâmetros das equações da potência e corrente buscando controlar os níveis de erro do modelo matemático existente utilizando conjuntos *fuzzy*.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do Laboratório de Energização Rural-LER/Botucatu

De modo a simular e aplicar o modelo matemático a qual foi desenvolvido para a finalização do projeto para sistemas fotovoltaicos, utilizou-se medições de campo obtidas no Laboratório de Energização Rural do Departamento de Engenharia Rural da UNESP, Faculdade Ciências Agrônômicas, Fazenda Experimental Lageado (FIGURA 1), localizada no município de Botucatu, São Paulo, com localização geográfica definida pelas coordenadas 22° 51' Latitude Sul (S) e 48° 26' Longitude Oeste (W) e altitude média de 786 metros acima do nível do mar. A velocidade média mensal do vento a 10m de altura no local é 3,1 m.s⁻¹ e a energia solar global média mensal diária é de 4772,13 Wh.m⁻².



FIGURA 1. Vista panorâmica do NEAR e da instalação do sistema híbrido eólico fotovoltaico.
Panoramic view do near and installation of photovoltaic hybrid wind system

Para constituição do sistema fotovoltaico, com relação à geração de energia elétrica a partir da energia solar incidente no local, foram utilizados três módulos fotovoltaicos de silício monocristalino I-100 da ISOFOTON com potência nominal de 100 Wp cada (perfazendo um total de 300 Wp instalados), com especificações técnicas de 36 células em série, 2 células em paralelo, 0,72 m² de área de células, e TONC (800 W.m⁻², 20 °C, AM 1,5, 1 m.s⁻¹) de 47 °C (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Tabela 1). Os dados utilizados fornecidos pelo fabricante dos painéis para simulação nos modelos analíticos/elaboração de curvas desenvolvidos e também para comparação dos resultados das equações são descritos na TABELA 1.

TABELA 1. Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos que foi utilizado no sistema.
Technical specifications of the PV modules that was used in the system.

Especificações do Módulo I-100/12

Física

Dimensões	1310 mm × 654 mm × 39,5 mm
Número de células em série	36
Número de células em paralelo	2
Área de células do módulo	0,72 m ²
TONC (800 W/m ² , 20 °C, AM 1,5, 1 m.s ⁻¹)	47 °C
Elétricas (1000 W.m ⁻² , 25 °C célula, AM 1,5)	
Tensão nominal	12 V
Potência máxima (P_{max})	100 Wp ± 10 %
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	6,54 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,6 V
Corrente de potência máxima (I_{max})	5,74 A
Tensão de potência máxima (V_{max})	17,4 V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação do conjunto *fuzzy* de curvas de corrente e potência corrigidas do LER/Botucatu

Foram criadas classes de curvas, a partir da lógica *fuzzy*, representando todas as possíveis aproximações entre a curva gerada pelo modelo matemático e a curva ajustada às *Condições de Teste em Campo (STC)* apresentadas pelo fabricante.

Para a curva da corrente I , tem-se o seguinte ajuste genérico proposto (utilizando as substituições $V = 0,9553.V^*$ e $I = 1,0793.I^*$)

$$I = 3,27 \left[1 - \exp\left(\frac{V - 0,5373}{0,0256955}\right) \right] \Rightarrow 1,0793.I^* = 3,27 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{0,9553.V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right],$$

$$\tilde{i}_{corr}.I^* = 3,27 \left[1 - \exp\left(\frac{\tilde{v}_{corr}.V^* - 0,5377}{0,0256955}\right) \right]$$

permitindo assim estabelecer a nova equação:

onde \tilde{i}_{corr} e \tilde{v}_{corr} são conjuntos *fuzzy* cujas funções de pertinência (Figura 2) têm o seguinte comportamento:

$$\mu_{i_{corr}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 1 \\ \frac{x - 1}{1,0793 - 1}, & \text{se } 1 < x \leq 1,0793 \\ 0, & \text{se } x > 1,0793 \end{cases}$$

e

$$\mu_{v_{corr}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < 0,9553 \\ \frac{x - 1}{0,9553 - 1}, & \text{se } 0,9553 < x \leq 1 \\ 0, & \text{se } x > 1 \end{cases}$$

assim, para o conjunto *fuzzy* \tilde{i}_{corr} , se $1 < x \leq 1,0793$, então:

$$\mu = \frac{x - 1}{1,0793 - 1} \Rightarrow \mu(1,0793 - 1) = x - 1 \Rightarrow x = \mu(1,0793 - 1) + 1 \Rightarrow$$

$$x = 0,0793 \cdot \mu + 1,$$

e para o conjunto *fuzzy* \tilde{v}_{corr} , se $0,9553 < x \leq 1$, então:

$$\mu = \frac{x - 1}{0,9553 - 1} \Rightarrow \mu = \frac{x - 1}{-0,0447} \Rightarrow -0,0447\mu = x - 1 \Rightarrow x = -0,0447\mu + 1.$$

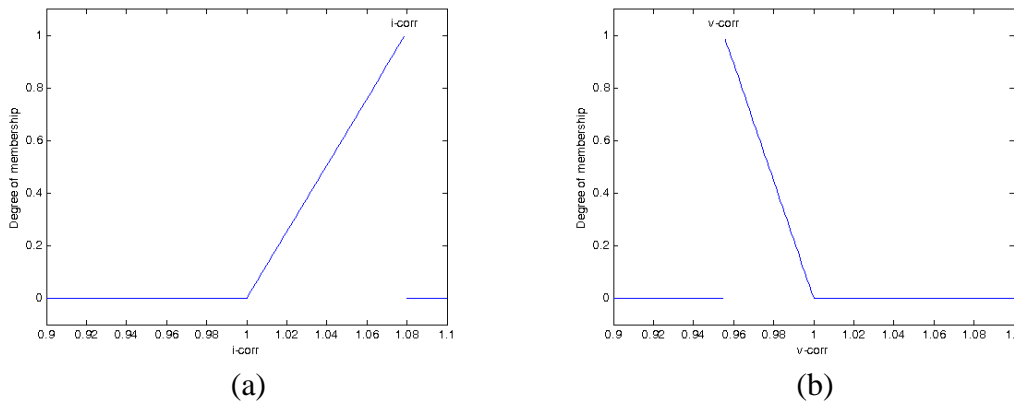


FIGURA 2. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* (a) \tilde{i}_{corr} e (b) \tilde{v}_{corr} . **Membership functions of fuzzy sets (a) \tilde{i}_{corr} e (b) \tilde{v}_{corr} .**

Nestas condições, Figura 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**tem-se que:

$$(0,0793\mu + 1) \cdot I^* = 3,27 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{(-0,0447\mu + 1) \cdot V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right] \Rightarrow$$

$$I^* = \frac{3,27}{0,0793\mu + 1} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{(-0,0447\mu + 1) \cdot V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right]$$

Notemos que, se (grau de pertinência 1 ao ajuste), a equação abaixo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e representará o ajuste máximo (equação ajustada às informações do fabricante), pois:

$$I^* = \frac{3,27}{0,0793 \cdot 1 + 1} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{(-0,0447 \cdot 1 + 1) \cdot V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right] \Rightarrow$$

$$I^* = 3,03 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{0,9553 \cdot V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right]$$

Agora, se $\mu = 0$ (grau de pertinência 0 ao ajuste), a equação gerada será a Equação (14), e representará a ausência de ajuste (equação dada pelo modelo matemático), pois:

$$I^* = \frac{3,27}{0,0793 \cdot 0 + 1} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{(-0,0447 \cdot 0 + 1) \cdot V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right] \Rightarrow$$

$$I^* = 3,27 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right]$$

Para a curva de potência P , tem-se, que:

$$P^* = I^* \cdot V^* \Rightarrow$$

$$P^* = \frac{3,27 \cdot V^*}{0,0793\mu + 1} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{(-0,0447\mu + 1) \cdot V^* - 0,5373}{0,0256955}\right) \right]$$

Determinação das curvas de corrente e potência corrigidas do LabMac/Tupã

Faz-se necessário determinar alguns valores característicos do sistema fotovoltaico em relação à célula fotovoltaica e ao módulo fotovoltaico. Neste primeiro sistema, o módulo é constituído de 36 células agrupadas em série ($N_{sc} = 36$) e não existe ligação em paralelo ($N_{pc} = 1$).

De acordo com as especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos fornecida pelo fabricante, obtêm-se os dados da Tabela 2.

TABELA 2. Valores característicos do módulo fotovoltaico fornecidos pelo fabricante na condição padrão de operação (TECNOMETAL, 2013). **Characteristic values of the photovoltaic module provided by the manufacturer in the standard operating condition (TECNOMETAL, 2013).**

Valores Característicos	Célula	Módulo
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}), [V]	-	22,2
Corrente de Curto Circuito (I_{sc}), [A]	-	8,36
Tensão de Potência Máxima (V_{max}), [V]	-	18,0
Corrente de Potência Máxima (I_{max}), [A]	-	7,67
Potência Máxima (P_{max}), [Wp]	-	140
Resistência Série (R_s), [Ω]	-	-
Tensão Térmica (V_t), [V]	-	-

Os valores característicos para a célula fotovoltaica apresentados na Tabela 2 podem ser calculados através das leis de associações em série e em paralelo de resistências com tensões e corrente associadas, exceto os parâmetros Resistência Série e a Tensão Térmica. Os cálculos são apresentados logo abaixo:

- $V_{ocm} = N_{sc}V_{occ} \Rightarrow V_{occ} = \frac{V_{ocm}}{N_{sc}} = \frac{22,2}{36} = 0,617 \Rightarrow V_{occ} = 0,617$
- $I_{scm} = N_{pc}I_{scc} \Rightarrow I_{scc} = \frac{I_{scm}}{N_{pc}} = \frac{8,36}{1} = 8,36 \Rightarrow I_{scc} = 8,36$
- $V_{maxm} = N_{sc}V_{maxc} \Rightarrow V_{maxc} = \frac{V_{maxm}}{N_{sc}} = \frac{18}{36} = 0,5 \Rightarrow V_{maxc} = 0,5$
- $I_{maxm} = N_{pc}I_{maxc} \Rightarrow I_{maxc} = \frac{I_{maxm}}{N_{pc}} = \frac{7,67}{1} = 7,67 \Rightarrow I_{maxc} = 7,67$

$$\bullet P_{maxc} = V_{maxc}I_{maxc} = \frac{V_{maxm}I_{maxm}}{N_{sc}N_{pc}} = \frac{18,7,67}{36,1} = 3,889 \Rightarrow P_{maxc} = 3,835$$

Quanto a Tensão Térmica, em condições de teste em campo, a temperatura da célula é 25° C e desta forma, $T_c = (273,16 + 25) K = 298,16K$. Observando-se que a constante de Boltzmann é dada por $k = 1,3806505 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$, a carga do elétron é $e = 1,60205 \cdot 10^{-19} C$ e considerando o fator de idealidade do diodo como sendo $m = 1$ (condição ótima), calcula-se, respectivamente, a tensão térmica da célula e do módulo fotovoltaico.

Com isso, temos os valores característicos para a célula fotovoltaica (Tabela 3).

TABELA 3. Valores característicos da célula e do módulo fotovoltaico em *Condições de Teste em Campo* obtidos pelas informações do fabricante. **Characteristic values of the cell and PV module Field in Test Conditions obtained the manufacturer's information.**

Valores Característicos	Célula	Módulo
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	0,617	22,2
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	8,36	8,36
Tensão de Potência Máxima (V_{max})	0,5	18,0
Corrente de Potência Máxima (I_{max})	7,67	7,67
Potência Máxima (P_{max})	3,835	140
Resistência Série (R_s)	0,0063	0,2278
Tensão Térmica (V_t)	0,0257	0,925

Para a determinação do erro entre os dados das condições de teste em campo (Tabela 8) e os obtidos pelos modelos matemáticos, serão determinados os pontos de potência máxima da célula solar fotovoltaica através do Teorema 2. Utilizando os valores de R_s e V_t presentes na Tabela 8, e também alguns dados fornecidos pelo fabricante, é possível aplicar o Método de Newton para a obtenção do valor de V_{max} na seguinte equação:

$$V_{max} - V_{oc} + I_{sc}R_s + V_t \ln \left(1 + \frac{V_{max}}{V_t} \right) = 0,$$

em que considerou-se $f(x)$ igual ao primeiro membro de (35), $x = V_{max}$ e $x_0 = 0,48$ obtendo-se o valor da tensão máxima para a célula $V_{maxc} = 0,487174$ (Tabela 4).

TABELA 4. Resultados do Método de Newton. **Results of Newton's Method**

n	x_n	$f(x_n)$	$f'(x_n)$	x_{n+1}	Estimativa do Erro
0	0,48	-0,00753596	1,0508121	0,4871715577	2,55973E-06
1	0,4871715577	-2,55973E-06	1,0501016	0,4871739953	2,90212E-13
2	0,4871739953	-2,90212E-13	1,0501014	0,4871739953	0

Pelas equações apresentadas e com os valores constantes relacionados, para as condições de teste em campo de cada célula fotovoltaica do módulo em estudo, é possível obter a curva característica e a curva da potência para a célula

Os valores acima apresentados constituem aproximações dos valores fornecidos pelo fabricante nas condições de teste em campo, cujas comparações são dadas pela Tabela 5.

TABELA 5. Comparações dos valores característicos nos pontos de potência máxima da célula fotovoltaica nas STC. **Comparisons of the characteristic values in the maximum power point of the photovoltaic cell in STC.**

Valores Característicos Célula	Especificado pelo fabricante	Modelo Matemático	Erro
Tensão de Potência Máxima	0,5	0,487174	-2,57%
Corrente de Potência Máxima	7,67	7,9412	3,54%
Potência Máxima	3,835	3,8687	0,88%

Na Tabela 5, é possível observar valores distintos nas grandezas especificadas pelo fabricante e os valores calculados através do modelo matemático, com os respectivos erros entre elas nas condições de teste em campo. Tais diferenças não são devidas ao modelo numérico aplicado, pois pela Tabela 5, o erro foi nulo e também não são atribuídas às observações realizadas em condições padrão pelo fabricante, frente a testes meticolosos realizados em laboratórios. Os erros são devidos aos procedimentos analíticos utilizado no modelo descrito, pois as equações presentes na literatura que aqui foram utilizadas para o desenvolvimento dos teoremas demonstrados já possuem hipóteses que não consideram certos fenômenos elétricos. Sendo assim, pode-se considerar que possivelmente todos os valores a serem obtidos pelos cálculos propostos terão sempre um erro. Desta forma, faz-se necessária, quando na criação dos gráficos de corrente e potência, considerar tal erro de aproximação para adequação das equações existentes da literatura à realidade.

Logo, será considerado que os maiores erros possíveis para valores quaisquer de P, V e I são os erros observados (Tabela 3) para o ponto de potência máxima (P_{max}), e a tensão (V_{max}) e corrente (I_{max}) que produzem tal potência. Para adequação às condições de teste em campo, fica então estabelecido pela Figura 3 que os erros em relação aos dados fornecidos pelo fabricante de tensão, corrente e potência serão de -2,27%, 3,54% e 0,50%, respectivamente. Logo, criam-se as variáveis V^* , I^* e P^* para tais grandezas em condições de teste em campo e, conseqüentemente, tem-se que $V = 0,9743.V^*$, $I = 1,0354.I^*$ e $P = 1,0088.P^*$. Substituindo esses valores nas equações abaixo, têm-se novas equações para corrente e potência:

$$I^* = 8,074 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{0,9743.V^* - 0,564}{0,0256955}\right) \right]$$

E

$$P^* = 8,074V^* \left[1 - \exp\left(\frac{0,9743.V^* - 0,564}{0,0056955}\right) \right]$$

Na FIGURA3, é apresentada uma comparação entre as curvas da corrente e potência da célula solar fotovoltaica em função da tensão nas condições padrão de operação através das equações ajustadas às condições de teste em campo apresentadas pelo fabricante (Figura 3).

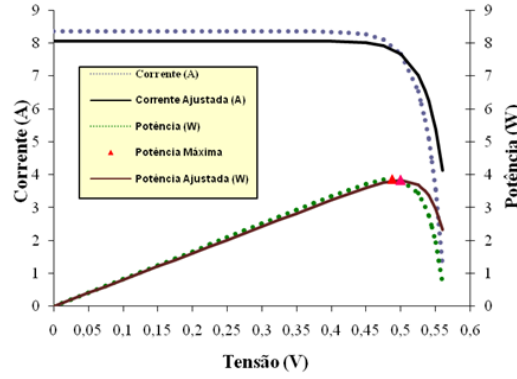


FIGURA 3. Comparação entre as curvas da corrente e potência da célula fotovoltaica e as curvas referentes às equações ajustadas para as STC apresentadas pelo fabricante, para o LabMac/Tupã. **Comparison between the current and power curves of the photovoltaic cell and the curves for the equations given adjusted to the STC by the manufacturer for LabMac / Tupa.**

Para a determinação do conjunto *fuzzy* de curvas de corrente e potência corrigidas do LabMac/Tupã, foram criadas classes de curvas, a partir da lógica *fuzzy*, representando todas as possíveis aproximações entre a curva gerada pelo modelo matemático e a curva ajustada às *Condições de Teste em Campo* apresentadas pelo fabricante.

Para a curva da corrente I , tem-se o seguinte ajuste genérico proposto (utilizando as substituições $V = 0,9743.V^*$ e $I = 1,0354.I^*$):

$$I = 8,36. \left[1 - \exp\left(\frac{V-0,564}{0,0256955}\right) \right] \Rightarrow 1,0354.I^* = 8,36. \left[1 - \exp\left(\frac{0,9743.V^*-0,564}{0,0256955}\right) \right]$$

$$\text{permitindo estabelecer a nova equação: } \tilde{i}_{corr}.I^* = 8,36. \left[1 - \exp\left(\frac{\tilde{v}_{corr}.V^*-0,564}{0,0256955}\right) \right],$$

onde \tilde{i}_{corr} e \tilde{v}_{corr} são conjuntos *fuzzy* cujas funções de pertinência (FIGURA4) têm o seguinte comportamento:

$$\mu_{\tilde{i}_{corr}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 1 \\ \frac{x-1}{1,0354-1}, & \text{se } 1 \leq x \leq 1,0354 \\ 0, & \text{se } x > 1,0354 \end{cases} \Rightarrow \mu_{i_{corr}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 1 \\ \frac{x-1}{0,0354}, & \text{se } 1 \leq x \leq 1,0354 \\ 0, & \text{se } x > 1,0354 \end{cases}$$

e

$$\mu_{\tilde{v}_{corr}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < 0,9743 \\ \frac{x-1}{0,9743-1}, & \text{se } 0,9743 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{se } x > 1 \end{cases} \Rightarrow \mu_{v_{corr}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < 0,9743 \\ \frac{1-x}{0,0257}, & \text{se } 0,9743 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{se } x > 1 \end{cases}$$

Assim, para o conjunto *fuzzy* \tilde{i}_{corr} , se $1 < x \leq 1,0354$, então:

$$\mu = \frac{x-1}{0,0354} \Rightarrow 0,0354.\mu = x-1 \Rightarrow x = 0,0354.\mu + 1$$

e para o conjunto *fuzzy* \tilde{v}_{corr} , se $0,9743 < x \leq 1$, então:

$$\mu = \frac{1-x}{0,0257} \Rightarrow 0,0257.\mu = 1-x \Rightarrow x = -0,0257\mu + 1.$$

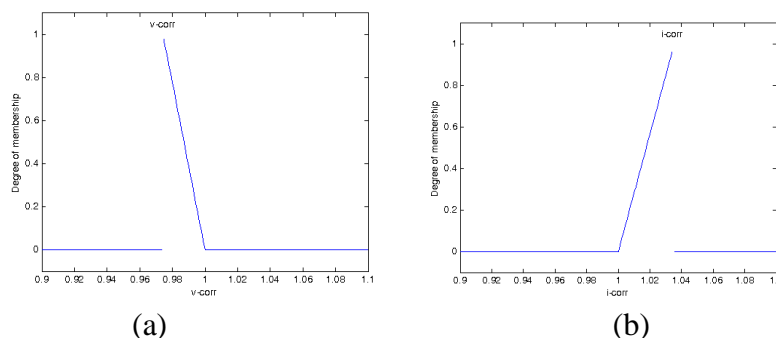


FIGURA 4. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* (a) \tilde{i}_{corr} e (b) \tilde{v}_{corr} . **Membership functions of fuzzy sets (a) \tilde{i}_{corr} e (b) \tilde{v}_{corr} .**

CONCLUSÕES

As análises das voltagens de potência máxima foram determinadas por meio de testes feitos em campo, além de dados fornecidos pelos fabricantes dos 2 sistemas solares, desta forma sendo possível estabelecer a potência máxima e teoremas sobre curvas de corrente e potência fotovoltaicos, descrevendo os resultados práticos (Condições de Teste em Campo) e resultados genéricos, realizados nos sistemas fotovoltaicos dos laboratórios da Unesp, Campus de Botucatu (LER) e Campus de Tupã (LabMac).

As estimativas via lógica fuzzy dos parâmetros das equações da potência e corrente mostrarem-se satisfatória no sentido do controle dos níveis de erro dos modelos matemáticos existente (potência e corrente) uma vez que agora é possível expressar todas suas possíveis curvas que caracterizam um sistema fotovoltaico, desde a que contém erros matemáticos do modelo original, até a com ajuste perfeito às condições de campo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. F., CAGNON, J. A. **Desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos.** Revista Energia na Agricultura, Botucatu, 2010, vol. 25, n. 2, p. 1-19.
- CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia fotovoltaica.** Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico - DEEC/Secção de Energia - Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Maio/2008 (edição 2.2).
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, CRESESB, 1999.
- FRAGA, J. R. C. P. **Análise do comportamento da bateria utilizada em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte.** Botucatu, 2009. Tese (doutorado em Energia na Agricultura). UNESP/FCA.
- KOLLING, E. M.; SOUZA, S. N. M. de; RICIERI, R. P.; SAMPAIO, S. C.; DALLACORT, R. **Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p.527-535, 2004.

MACIEL, N. F.; LOPES, J. D. S.; LIMA, F. Z. **Energia Solar para o Meio Rural – Fornecimento de Eletricidade**. CPT, Viçosa, 2008.

MARINI, J. A.; ROSSI, L. A. **Sistematização do dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos isolados por meio de programa computacional**. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 2005, v. 25, n. 1, p. 67-75.

TECNOMETAL ENERGIA SOLAR. **Módulos geradores fotovoltaicos SV-17D12 a SV-230D20**. Disponível em: <<http://www.tecnometalenergiasolar.com.br/pdf/SV17D12.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2013.