



## **CONTROLE DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM ASSENTAMENTO RURAL**

**Alexandre M. F. Guimarães** – alexandremagnus@ect.ufrn.br

**Clênia J. Guedes** – cleniamedeiros01@hotmail.com

**Gabriel G. de Barros** – gabriel\_gomesggb@hotmail.com

**Hugo Á. A. da Costa** – hugo.aac1@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola de Ciências e Tecnologia  
Av. Salgado Filho, S/N, Campus Universitário – Lagoa Nova  
59078-970 – Natal – Rio Grande do Norte

**Resumo:** Pensando em formas de melhorar a eficiência da produção da energia elétrica por painéis fotovoltaicos propostos como fonte de energia renovável pelo projeto Defeso da Caatinga no assentamento rural Trangola, na cidade de Currais Novos/RN, este trabalho se propôs a pesquisar meios de maximizar a eficiência energética sem alterar aspectos construtivos dos painéis. Também pretende-se propiciar ao discente um contato com as realidades sociais e as oportunidades de aplicação de seus conhecimentos na solução de problemas. Aproveitando as características dos painéis é possível usar um conversor controlado ligado aos mesmos para buscar o ponto de operação que gere a máxima potência possível. Para esta busca foram utilizados os métodos Perturba e Observa (P&O), Condutância Incremental e Lógica Fuzzy, sendo todos os resultados e comparações simulados no MATLAB/Simulink®.

**Palavras-chave:** MPPT, Energia Solar, Perturba e Observa, Condutância Incremental, Lógica Fuzzy.

### **1. INTRODUÇÃO**

A energia solar está cada vez mais em ascensão em todo mundo, no Brasil, somente no ano de 2016 ocorreu um aumento na potência de produção distribuída de 320%. Em junho do mesmo ano, o Rio Grande do Norte apresentava em torno de 70 sistemas instalados e ligados a rede da companhia energética local (Cosern), segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar). Em alguns lugares do sertão do RN, mais especificamente no assentamento rural Trangola, na cidade de Currais Novos, as pessoas enfrentam problemas de acesso a água potável e arcam com os custos de manutenção dos serviços pela Cosern para bombeamento de água de poços e consumo geral das famílias.

Tendo vista essas necessidades, foi criado um projeto elaborado pelo grupo denominado “Defeso da Caatinga”, que visa a melhoria da qualidade de vidas dos habitantes do assentamento rural Trangola através da recuperação do bioma por meio de reaproveitamento hídrico, dentre outras ações (GEPARN, 2017; Defeso da Caatinga, 2017). Uma das soluções

Organização



Promoção





possíveis é a obtenção de energia solar dedicada, considerando que o projeto defendido, cumpridas suas especificações, beneficiaria àqueles que nas circunstâncias atuais não dispõe das condições ideais para resolução da problemática identificada. Analisando tais objetivos, foi designado a este artigo a resolução de problemas ligados a eficiência energética.

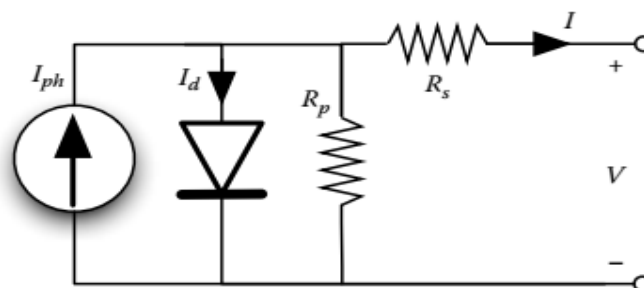
A citada localidade apresenta-se com boas condições para geração de energia solar. Em contrapartida, situações como irradiância e temperatura inconstante, prejudicam a máxima obtenção da potência fornecida. Este projeto visa a maximização da eficiência energética obtendo o MPPT (*Maximum Power Point Tracking* ou Rastreamento de ponto de Potência Máxima) dos painéis fotovoltaicos (PV - *Photovoltaic*) e, através de algoritmos específicos, ajustar a tensão ideal fornecida às cargas.

Este trabalho visa trazer informações valiosas para o ensino na engenharia, tais como a comparação dos métodos MPPT utilizados, mostrando qual o método mais eficiente e as condições em que ele ocorre. Para tal, a engenharia atua como um meio de desenvolvimento para a sustentabilidade e produtividade no local, sendo este o objetivo proposto pela pesquisa. O trabalho proporciona o contato direto do discente com problemas sociais, mostrando a necessidade do enfrentamento de questões como essas e as possíveis oportunidades de mercado após conclusão do curso.

## 2. MODELO DE SISTEMA PV

O circuito equivalente ideal que representa o modelo de um painel fotovoltaico tem sua representação na Figura 1:

Figura 1 – Circuito elétrico do modelo de sistema PV.



Fonte: (FEMIA et al., 2013, p.8).

A Equação (1) exibe o modelo matemático do PV, considerando a radiação solar constante. Onde  $I_{ph}$  é a fonte de corrente proporcional a intensidade da luz,  $I_{sat}$  é a corrente de saturação do diodo reverso,  $R_s$  é a resistência em série que descreve as perdas em resistivas do material,  $R_p$  é a resistência em paralelo que descreve as perdas que surgem devido a perturbação elétrica.

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{V+IR_s}{\eta V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (1)$$



A potência cresce proporcionalmente com a irradiância, enquanto que com o aumento da temperatura, a potência decresce.

A corrente de saturação do diodo reverso depende da temperatura, como conforme Equação (2).

$$I_{sat} = I_{rr} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot E_g}{\eta \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_r} - 1\right)} \quad (2)$$

Na qual  $T_r$  é a temperatura de referência,  $I_{rr}$  é a corrente de saturação não linear dependente da temperatura. A corrente  $I_{ph}$  depende da radiação incidente e da temperatura conforme ilustrado na Equação (3).

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha_t(T - T_r)] \cdot \frac{S}{1000} \quad (3)$$

Onde  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito da célula em radiação padrão e temperatura  $\alpha_t$  é o coeficiente de temperatura de curto-circuito,  $S$  é a radiação incidente dada em  $W/m^2$ .

### 3. RASTREAMENTO DO PONTO MÁXIMO DE POTÊNCIA MPPT

O rastreamento do ponto de máxima potência, MPPT, é uma parte integrante dos controladores de carga do sistema fotovoltaico. Ele possui a função de garantir que os painéis operem em seu ponto de máxima potência, mesmo que sofram interferências em sua geração, devido a mudança de intensidade de radiação solar, temperatura ou mudança de carga. Os algoritmos de MPPT fazem o rastreamento do ponto de potência máxima e desempenham um papel importante nos sistemas que é maximizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

O ponto onde ocorre o máximo aproveitamento da potência é onde a derivada da potência em função da tensão do sistema é igual a zero, conforme ilustrado na Equação (4). Os algoritmos dos controladores buscam atenuar, através dos conversores de tensão que acoplam o painel e a carga, a tensão fornecida pelo painel à carga, para que o ponto de trabalho da potência do sistema seja deslocado até o ponto de máxima potência.

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (4)$$

#### 3.1. Perturba e Observa (P&O)

O método P&O trabalha com duas interações: na primeira etapa será calculada a potência  $P_{pv}(k-1)$  com a corrente e a tensão de entrada do conversor, que correspondem as de saída do PV; o próximo passo é fazer pequenas perturbações no ciclo de trabalho, de forma que produza uma nova tensão e seja utilizada para calcular uma nova potência  $P_{pv}(k)$  (COELHO, 2008). O ciclo de trabalho é definido como a relação entre as frações de tempo que o conversor passa no estado ativo e inativo, essa relação determina o ganho do conversor, ou seja, a taxa de relação entre a tensão na saída pela tensão na entrada do conversor conforme Equação (5).

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{\tau}{T} \quad (5)$$

Organização



Promoção





A diferença entre as duas potências deve ser analisada para que seja identificado o sentido e direção para chegar ao melhor ponto de radiação e o ponto de operação seja direcionado para o ponto de máxima potência, fazendo alterações na tensão de entrada ( $V_{pv}$ ).

Uma desvantagem do método P&O está na realização de um novo ciclo de perturbação mesmo quando o MPP é alcançado, resultando em uma perda de potência.

### 3.2. Condutância Incremental (CI)

Seu princípio de operação está em fazer a comparação da condutância ( $GG$ ) e a Condutância Incremental ( $\Delta GG$ ) para decidir quando será necessário aumentar ou diminuir a proporção do ciclo de trabalho para alcançar o MPPT.

Derivando e dividindo a potência  $P_{pv}$  em relação tensão do PV, encontramos a relação descrita nas Equação (6) e (7):

$$\frac{1}{V_{pv}} * \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = GG + \Delta GG \quad (6)$$

Onde,

$$GG = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \text{ e } \Delta GG = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (7)$$

A posição do ponto de operação será indicada pelo sinal de ( $GG + \Delta GG$ ) e a intensidade do incremento será definida por seu módulo. Para que haja um incremento no ciclo de trabalho é necessário que o ponto de operação esteja além do MPP ( $GG < \Delta GG$ ), caso contrário, haverá um decremento do ciclo de trabalho. Esse método apesar da maior complexidade em relação ao Perturba e Observa apresenta resultados similares, logo ainda não é satisfatório se o que se busca é o máximo aproveitamento energético possível.

### 3.3. Controle por Lógica Fuzzy (FLC)

São utilizados para determinar o ponto de operação correspondente a potência máxima nos níveis de irradiância e temperatura (REKIOUA, 2012). Este método segue uma lógica de subconjuntos, sendo estes subconjuntos regras a serem estabelecidas de acordo com as variações da potência e da tensão. A partir do procedimento de aceitação destas regras, o ponto de operação convergirá ao ponto ótimo. Mais detalhes do controle por logica Fuzzy na seção 5.

## 4. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para testar as hipóteses levantadas por esse trabalho foram realizadas simulações utilizando o software MATLAB/Simulink®. Foi pensado um sistema contendo um painel fotovoltaico que fornece até 5 kW de potência a depender das condições do ambiente. Esse painel foi ligado a um conversor elevador de tensão, tipo Boost. Para alimentar as unidades consumidoras, modeladas como cargas RL, foi usado um inversor de onda completa. O circuito pode ser observado na Figura 2. Destaca-se que o ciclo de trabalho do Boost é determinado pelo método de MPPT que se está simulando, podendo ele ser um dos três abordados nesse trabalho e o inversor é controlado de tal forma que trabalhe na frequência de 60 Hz, a mesma da rede elétrica do sistema da Cosern.

Organização

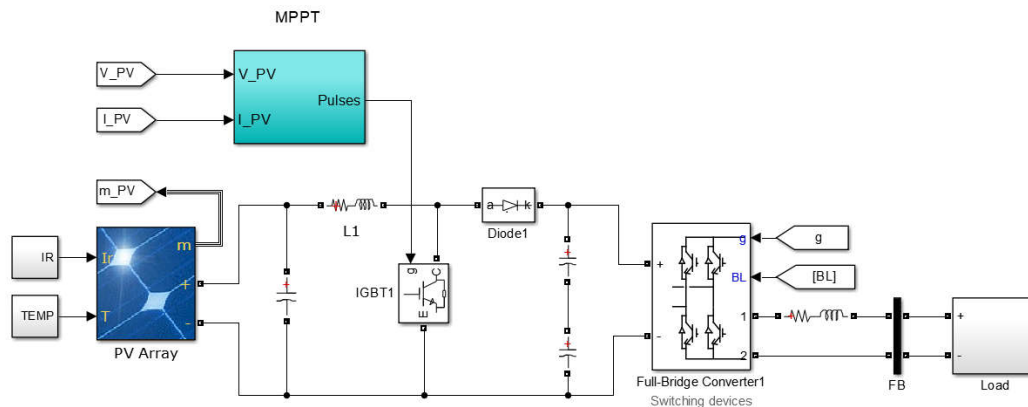


Promoção





Figura 2 – Circuito utilizado nas simulações no software MATLAB/Simulink®.



O painel fotovoltaico nessa simulação é composto por 16 módulos dispostos em 4 fileiras conectadas em paralelo onde cada fileira é composta por 4 módulos conectados em série. Os módulos simulados são os do fabricante SunPower e produzem 315 W de potência quando submetidos a uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ . As características dos módulos individuais podem ser visualizadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características elétricas do painel adotado.

Corrente de Curto-Circuito	6,14 A
Tensão de Circuito Aberto	64,6 V
Corrente no máximo ponto de potência	5,76 A
Tensão no máximo ponto de potência	54,7 V

## 5. CONTROLADOR POR LÓGICA FUZZY PROPOSTO

O sistema aqui proposto usa como variáveis de entrada a mudança na potência do painel (dP) e a mudança na tensão nos terminais do painel (dV). Como variável de saída tem-se a mudança no ciclo de trabalho, que é usada para controlar o conversor Boost.

Todas as três variáveis são associadas a variáveis linguísticas usando cinco subconjuntos Fuzzy, sendo eles: NB (negativa e grande), NS (negativa e pequena), ZE (próxima de zero), PS (positiva e pequena) e PB (positiva e grande). As funções de pertinência utilizadas possuem o mesmo formato, variando apenas o peso que é aplicado a cada uma delas. A base de regras foi definida a partir dos conhecimentos de como o sistema se comporta. Para a inferência foi utilizado o método de Mandani e para a defuzzificação a técnica do centroide. Um resumo das características do FLC pode ser visto nas Figuras 3, 4 e Tabela 2.





Figura 3 – Arquitetura do FLC proposto configurado no software MATLAB/Simulink®.

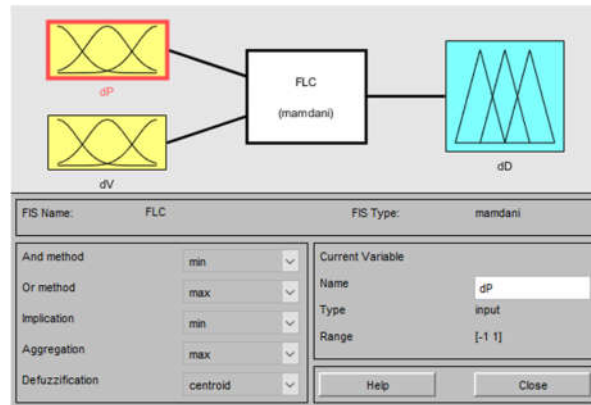


Figura 4 – Funções de pertinência para a entrada dP e dV.

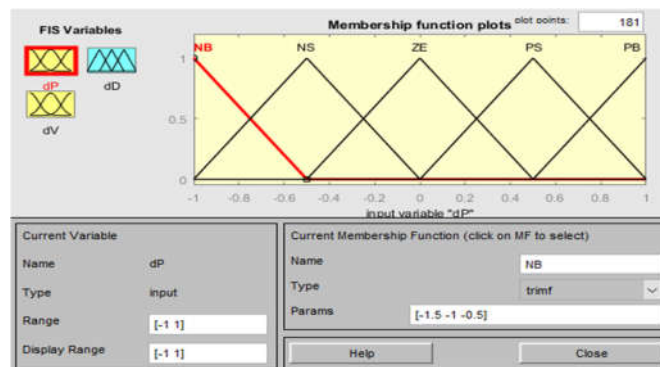


Tabela 2 – Regras propostas para o FLC.

dP \ dV	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	PS	PS	PB
NS	NS	NS	NS	PS	PS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PS	PS	PS	NS	NS
PB	PB	PS	NS	NS	NB

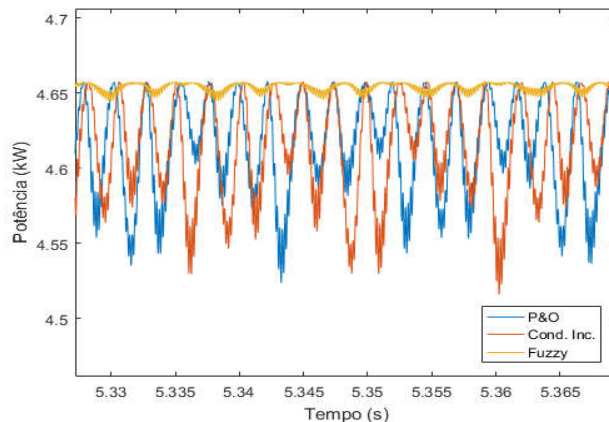
## 6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A partir das simulações foi possível observar algumas vantagens do método de MPPT usando lógica Fuzzy perante aos dois outros métodos clássicos abordados. Em primeiro, constata-se que o método usando lógica Fuzzy apresenta menos oscilações em regime permanente. Para averiguar isso foi realizada uma simulação na qual uma carga resistiva em corrente contínua foi ligada diretamente ao Boost; isto foi feito para que se possa observar apenas as oscilações causadas pelos métodos sem que se acrescente a elas as oscilações



causadas naturalmente pelo inversor. As condições ambientais foram estabelecidas como irradiância e temperatura constantes. Observa-se que os métodos clássicos, “Perturba & Observa” e Condutância Incremental, apresentam oscilações significativamente maiores de potência em regime permanente em relação ao método baseado em lógica Fuzzy, como pode ser observado na Figura 5, com irradiância e temperatura constantes. Essas oscilações representam uma perda de energia já que fazem o sistema se afastar do ponto de máxima potência.

Figura 5 – Análise do comportamento da potência segundo os métodos de controle.



Na Figura 6 estão expostas as variações de irradiância e temperatura submetidas aos painéis, e na Figura 7 as respectivas respostas de potência segundo os métodos utilizados. Como pode-se perceber, as variações de potência são menores no método por lógica Fuzzy.

Figura 6 – Simulação de variações de irradiância e temperatura impostas aos painéis PV.

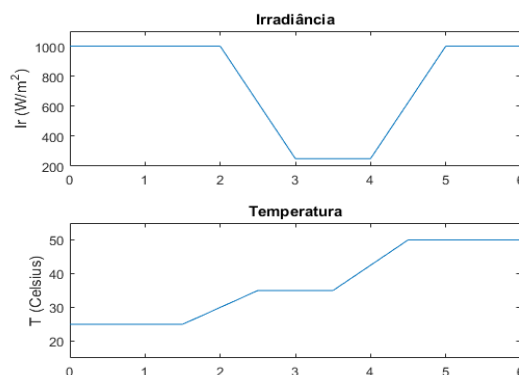
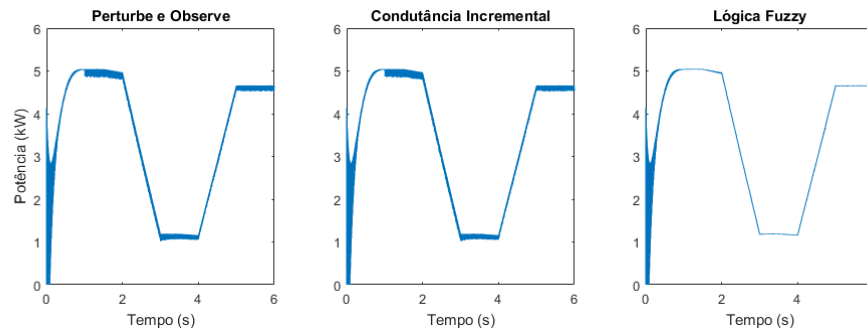




Figura 7 – Curvas de potência para cada método sob as condições especificadas na Figura 6.



Ao realizar o cálculo da energia gerada pelo painel durante a simulação com irradiância e temperatura que variam ao longo do tempo chegou-se aos seguintes valores apresentados na Tabela 3. Esse cálculo foi realizado utilizando a integral da curva de potência, entendendo assim que as áreas sob as curvas mostradas na Figura 7 são as energias produzidas pelo sistema naquele tempo de simulação.

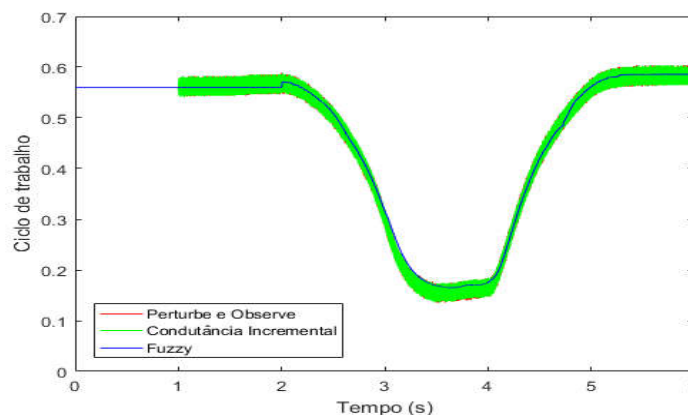
Tabela 3 – Comparativo da energia produzida pelo painel no tempo de simulação.

P&O	Cond. Inc.	Fuzzy
20,503 kJ	20,504 kJ	20,706 kJ

A partir disso, pode-se concluir que o método baseado em lógica Fuzzy apresenta uma eficiência superior em relação aos demais métodos.

O ciclo de trabalho representa a taxa de chaveamento da chave eletrônica IGBT1 do conversor da Figura 2. Quanto maior o chaveamento maior a perda de energia. A Figura 8 representa a variação do ciclo de trabalho de acordo com os métodos pesquisados.

Figura 8 – Comparativo da variação do ciclo de trabalho entre os métodos referente às variações apresentadas na Figura 6.







## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foram simulados três métodos distintos para obtenção do MPPT em painéis fotovoltaicos e ficou evidenciado, baseado nas simulações, que dentre eles o método baseado em lógica Fuzzy se destaca por apresentar os melhores resultados. Esse método extraiu maior potência, com menos oscilações de tensão e provou responder mais rápido às variações bruscas das condições ambientais. Esta pesquisa proporcionou conhecimentos tecnológicos, econômicos e sociais; onde a formação cidadã, juntamente com o entendimento e aplicações de energia sustentável, com foco na energia solar, foram acrescentados aos discentes de forma que possam contribuir para o desenvolvimento da engenharia e a responsabilidade social empunhada pelos engenheiros. No futuro, espera-se expandir esse trabalho aprofundando ainda mais na otimização do método Fuzzy e migrar de simulações computacionais para aplicações práticas. Principalmente espera-se poder aplicar a técnica aqui desenvolvida como forma de melhorar obtenção de energia por parte de comunidades que dependam parcial ou totalmente de energia elétrica.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela disponibilização da estrutura do Laboratório de Eletrotécnica da Escola de Ciências e Tecnologia, bem como ao grupo GEPARN cujo Projeto Defeso da Caatinga foi o alvo das pesquisas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FEMIA, N.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. New York: CRC Press, 2013. 355p.
- VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1.ed. São Paulo, 2012.
- ZILLES, Roberto... [et al]. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo, 2012.
- Won C-Y, Kim DH, Kim SC, Kim WS, Kim H-S (1994). In: REKIOUA, Djalma;
- MATAGNE, Ernest. Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control. New York: Springer, 2012.
- TINA B. SELLES RIBEIRO, FERNANDO SELLES RIBEIRO, Atendimento de comunidades isoladas com geradores fotovoltaicos – Revista Fotovolt, ano 1 nº 1, agosto de 2015, Ed. Aranda.
- FEMIA, N.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. IEEE Transactions on Power Electronics, 20(4):963–973, 2005. In: FEMIA, N.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. New York: CRC Press, 2013. 355p.
- REKIOUA, D.; MATAGNE, E. Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control. New York: Springer, 2012. 296 p.
- YOUSSEF, E. B.; STHEPANE P.; BRUNO, E.; CORINNE, A. New P&O MPPT algorithm for FPGA implementation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Golden, p. 2868-2873. 2010.
- COELHO, R. F. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Instituto de Eletrônica de Potência. Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de

Organização



Promoção





Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos. 2008. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).

Blog do grupo de pesquisa GEPARN. Disponível em:

<<http://grupogeparnufrn.blogspot.com.br/>> Acesso em: 20 maio. 2017.

Rede social do Projeto Defeso da Caatinga. Disponível em: <<https://pt-br.facebook.com/defesodacaatinga/>> Acesso em: 20 maio. 2017.

## MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROL IN PHOTOVOLTAIC PANELS APPLIED IN RURAL SETTLEMENT

**Abstract:** Looking for ways to improve electric energy production efficiency by photovoltaic panels as reusable energy source proposed by the project "Defeso da Caatinga" to apply on the Trangola rural settlement located in Currais Novos city (Brazil, RN). This work intends to research ways to maximize efficiency without changing building factors of the solar panels. It is also intended to provide the undergraduate with a contact with the social realities and opportunities of applying their knowledge in solving problems. Taking advantage of the PV panels characteristics it is possible to use a controlled converter connected to the panels to track the operation point that provide the maximum power as possible. For this search, the methods used were: Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance and Fuzzy logic. All the results were simulated using MATLAB/Simulink®.

**Key-words:** MPPT, Solar Energy, Perturb and Observe, Incremental Conductance, Fuzzy Logic.

Organização



Promoção

