

APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Augusto Hafemeister – augustohaf@hotmail.com

João Batista Dias – joabd@unisinis.br

Leonel Augusto Calliari Poltosi – lpoltosi@unisinis.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM

Resumo. *O presente trabalho apresenta a aplicação do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em módulos fotovoltaicos. O sistema foi modelado e simulado com base nas características de um módulo específico. Também foi desenvolvido um protótipo para aplicação do conceito estudado, baseado em um microcontrolador PIC18F4550, um conversor CC/CC de topologia Boost e circuitos eletrônicos que monitoram, de maneira eficaz, a tensão e a corrente do módulo, para posterior cálculo e análise da potência gerada. Para atingir as metas estabelecidas, o sistema foi modelado utilizando-se o algoritmo de Perturbação e Observação (P&O), que se trata de um método tradicional estudado por diversos autores. Contudo, o principal diferencial dessa pesquisa está na aplicação prática do conceito, através de um protótipo experimental, o qual permite realizar ensaios para validar os resultados encontrados e comparar, submetendo-o às mesmas condições de operação, a eficiência do sistema operando com e sem o algoritmo. Enfim, a motivação para o desenvolvimento deste projeto está em apresentar a importância da utilização de algoritmos MPPT em conversores CC/CC para aumentar em até 73% a potência gerada pelo módulo e manter sempre constante a tensão que carrega baterias, se transformando numa alternativa viável para sistemas isolados (Off-Grid), usados em zonas rurais ou locais em que a extensão da rede elétrica apresenta-se inviável; ou também em sistemas para conexão à rede elétrica (Grid-Tie), aumentando a energia injetada na rede, pois com o advento das resoluções N.º 482 e N.º 687 da ANEEL, muitas unidades de geração serão conectadas ao sistema de distribuição e os índices dos sinais gerados deverão estar dentro dos limites especificados pelo órgão regulador.*

Palavras-chave: Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT). Algoritmos. Conversores CC/CC.

1. INTRODUÇÃO

O aumento acelerado da demanda de energia elétrica em todo o mundo, em contraste com a necessidade de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, está fazendo com que os investimentos em fontes de energia renovável sejam cada vez maiores. A base mundial de geração de energia continua sendo as grandes usinas hidrelétricas, termelétricas a carvão e petróleo e usinas nucleares, porém já se tem observado um crescimento expressivo nas fontes alternativas, como energia eólica e energia solar. Esse crescimento é motivado pela redução nos custos de implantação e a adesão às novas políticas para minigeração e microgeração residencial. De acordo com Luque (2011), as principais vantagens da energia solar fotovoltaica são: a energia do Sol é abundante, acessível e infinita; os painéis fotovoltaicos não geram resíduos, ou seja, não contribuem para as mudanças globais do clima; os módulos fotovoltaicos apresentam vida útil elevada, devido à inexistência de partes móveis (sem desgaste), podendo chegar a 30 anos de operação; os painéis fotovoltaicos têm estrutura modular, ou seja, o sistema pode ser ampliado facilmente.

O principal fator que limita a utilização da energia proveniente do Sol é a baixa eficiência das células solares. Entre as soluções para esse fato, pode-se citar os sistemas de rastreamento da posição solar, a otimização da configuração e novas tecnologias. Uma característica que dificulta a extração da energia dos painéis solares é o comportamento não linear da tensão e corrente fornecidos pelo mesmo. Para cada valor de irradiação solar existe apenas um ponto em que a máxima potência é entregue para carga, conhecido como MPP (*Maximum Power Point*). Logo, é importante que os equipamentos atuem sempre buscando o melhor rendimento, para viabilizar financeiramente o investimento no sistema fotovoltaico. Além disso, a geração de energia através de painéis solares é muito dependente das condições climáticas do ambiente em que estão instalados. Devido a este fato, um sistema fotovoltaico deve ter uma ótima resposta às variações na baixa irradiação solar e também à alta temperatura, pois ambas as características diminuem seu desempenho. Os equipamentos comerciais destinados a aplicações de baixa capacidade, como por exemplo os importados e não certificados pelo INMETRO, não possuem um controle muito apurado, fazendo com que os padrões de qualidade para sincronismo com a rede de distribuição, especificados pela ANEEL, não sejam alcançados e, a energia injetada, prejudique os outros aparelhos que estão utilizando esse mesmo potencial.

Com base na motivação e no contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo modelar e simular um sistema fotovoltaico isolado com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) para comprovar o ganho real da aplicação do algoritmo em conversores CC/CC e desenvolver um protótipo para aplicar o conceito na prática.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de o Sol ser a principal fonte de energia de nosso planeta, apenas uma pequena parcela desse imenso potencial é explorada. Contudo, praticamente toda a energia utilizada atualmente tem origem no Sol. Hoje em dia, o ser humano precisa da energia para quase tudo, seja no local de trabalho ou em sua própria casa, para utilizar eletrodomésticos, computadores, celulares, entre outros. Porém, essa utilização massiva tem um alto custo para o planeta, pois a matriz energética ainda depende muito de fontes não renováveis, as quais prejudicam o ecossistema. A relação direta existente entre a disponibilidade de eletricidade e a melhoria do desenvolvimento social reafirma a importância das fontes energéticas para a humanidade.

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da radiação solar em eletricidade, sendo que tudo ocorre quando radiação incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas. Uma célula fotovoltaica típica e com radiação solar intensa produz uma tensão de 0,4 a 0,7 V, tipicamente 0,6 V, e uma intensidade de corrente de 3 A ou maior. Para se obter uma tensão maior, ligam-se as células em série e, para se obter maior corrente, ligam-se as células em paralelo, constituindo o módulo fotovoltaico. Por exemplo, um módulo com 36 células associadas em série, apresenta uma tensão de circuito aberto de, aproximadamente, 21,6 V.

Um módulo fotovoltaico não se comporta como uma fonte elétrica convencional, pois a tensão de saída não é constante e depende também da corrente. Tudo depende da carga que está conectada aos terminais do módulo, pois quanto maior for a corrente consumida, menor será a tensão. O comportamento do módulo fotovoltaico é algo entre uma fonte de corrente e tensão, conforme mostra a Fig. 1, adaptada de Cupertino *et al.* (2012). Para cada curva de tensão versus corrente, existe uma curva de tensão versus potência gerada. No exemplo mostrado na Fig. 1a, existe um ponto identificado como MPP (*Maximum Power Point*), ou seja, esse local representa a melhor relação de tensão vezes a corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico. Além disso, quanto menor a irradiância solar, menor é a corrente, mantendo-se a tensão quase estabilizada (Fig. 1b). Quanto maior a temperatura do módulo, menor a tensão, sendo que a corrente se mantém estabilizada, com um leve incremento (Fig. 1c).

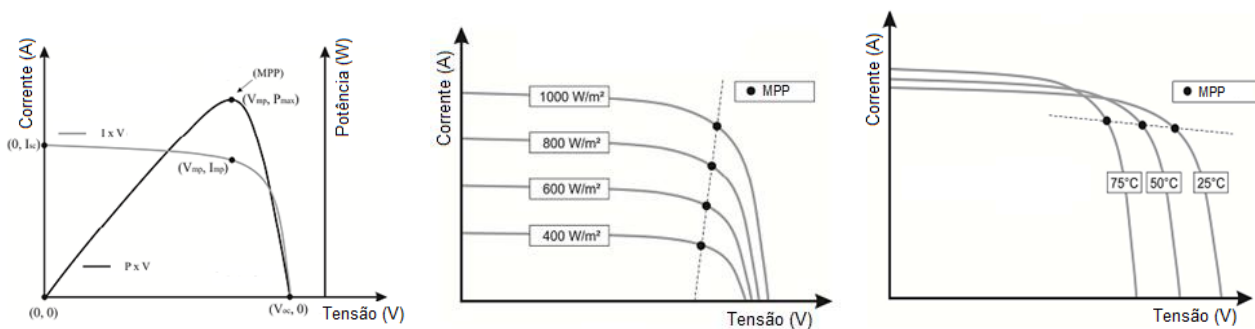


Figura 1 - Curva característica do módulo (a), Efeito de irradiância incidente (b), Efeito da temperatura (c).

Conforme ilustra a Fig. 2, adaptada de Cupertino *et al.* (2012), uma fonte de corrente I_{fv} com um diodo em paralelo é a representação mais simples de um módulo solar fotovoltaico. O valor de I_{fv} é proporcional ao nível de radiação solar incidente e temperatura sobre a célula. A tensão de saída V apresenta um comportamento não linear devido à presença do diodo no modelo equivalente. A resistência série R_s surge devido às soldas internas no substrato do material semicondutor e a junção nos terminais externos de saída, além da resistência do próprio material semicondutor. A resistência paralela R_p modela as correntes de fuga na superfície do material, o qual devido ao seu alto valor, pode ser desconsiderado na maioria das vezes. Tanto R_s como R_p influenciam diretamente na curva tensão versus corrente do módulo.

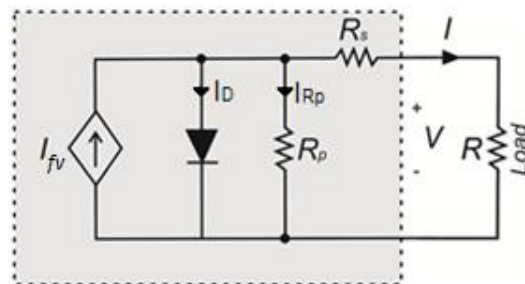


Figura 2 - Modelo equivalente de um módulo fotovoltaico.

2.2 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT)

O rastreamento do ponto de máxima potência, denominado em Inglês como *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), é muito utilizado na indústria de inversores para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. De acordo com Carvalho (2012), os controladores do ponto de máxima potência (MPP) começaram a ser desenvolvidos em 1968 com o intuito de melhorar o desempenho de sistemas constituídos por uma fonte não linear e uma carga arbitrária. A utilização de técnicas de rastreamento em sistemas fotovoltaicos produz um acréscimo de rendimento em torno de 15% a 30%, sendo que os principais requisitos são a convergência, a rápida resposta dinâmica, o pequeno erro em regime permanente, a robustez a distúrbios e a mesma eficiência em diferentes níveis de potência (Carvalho, 2012).

O controle de tensão e corrente é fundamental em qualquer fonte de energia para que seja possível manter os mesmos adequados com a variação da carga. No caso da energia solar isso não é diferente, pois é comum a utilização de conversores CC/CC (corrente contínua para corrente contínua) conectados diretamente ao módulo, seja para controle da máxima potência fornecida como também para conexão com baterias. Conforme visto anteriormente na Fig. 1a, o módulo solar possui uma curva característica de tensão-corrente e o mesmo pode operar em diferentes pontos de acordo com a carga do sistema. Caso essa seja abaixo da potência instalada, o módulo estará operando num ponto abaixo de sua capacidade máxima, desperdiçando energia. Logo, para que seja possível obter a máxima eficiência, se faz necessária aplicar técnicas de controle para manter o módulo operando no seu ponto de potência máxima (MPP).

Diversas técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência do módulo já foram publicadas, sendo que as principais análises abordadas são: fácil compreensão do algoritmo, aplicação prática e eficiência de rastreamento para um determinado conjunto de condições de operação (Faranda *et al.*, 2008). Os principais métodos existentes são: Método da Tensão Constante, Método da Perturbação e Observação (P&O), Método da Condutância Incremental (INC), Método da Correlação de *Ripple* (RCC), Método por Lógica *Fuzzy* (Nebulosa) e Método por Rede Neural.

2.3 Método da Perturbação e Observação (P&O)

Apesar de confundir-se com variações bruscas de temperatura e radiação solar (Femia, 2005) e apresentar perdas de energia devido ao desligamento do conversor e tempo de estabilização elevado (Villalva, 2010), o algoritmo de Perturbação e Observação é um dos mais utilizados, devido a sua praticidade de implementação e ótimo custo-benefício.

De acordo com Carvalho (2012), esse método opera “perturbando” a tensão de saída do módulo periodicamente. Conforme mostra o fluxograma da Fig. 3, adaptado de Brito *et al.* (2010), para cada novo valor de tensão é calculada a potência de saída, sendo então comparada com o valor anterior armazenado. Caso a potência aumente, o sistema de controle continuará a atuar naquele sentido; caso contrário, o sistema atuará no sentido oposto. Quando o ponto de máxima potência é alcançado, a tensão do módulo oscila continuamente em torno deste. O passo de variação da tensão é um parâmetro que deve ser ajustado para possibilitar o balanço entre a resposta mais rápida com a menor oscilação em regime permanente.

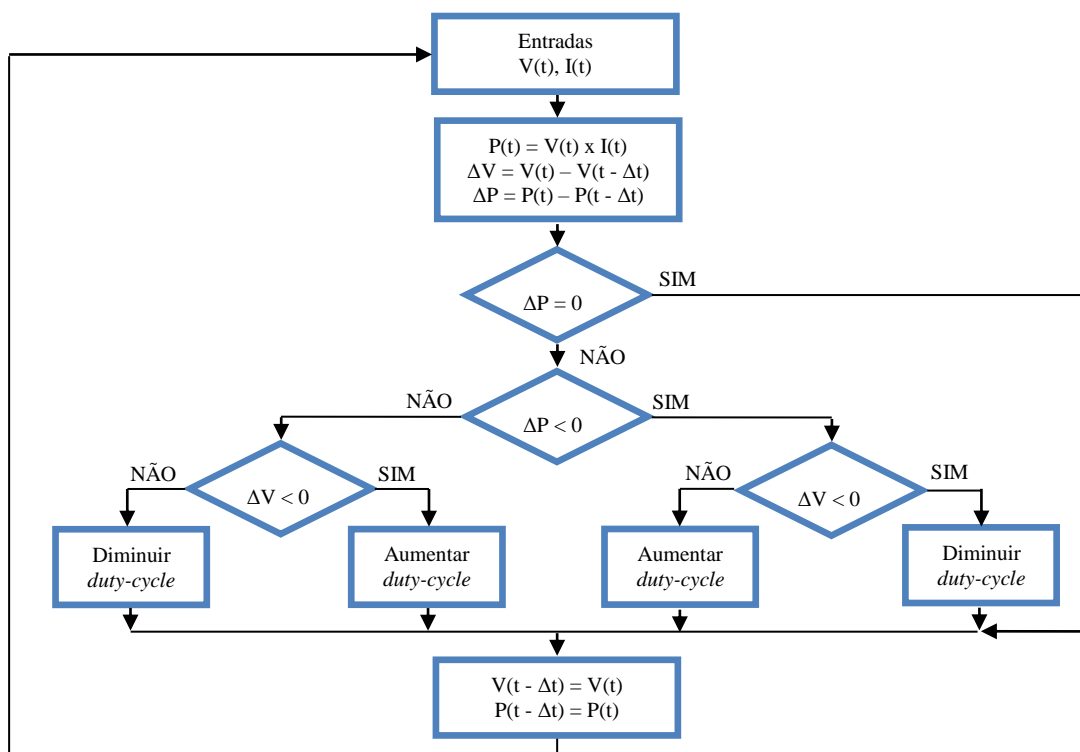


Figura 3 - Fluxograma do método de Perturbação e Observação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme apresentado anteriormente, o presente trabalho tem por objetivo modelar e simular um sistema fotovoltaico com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) para comprovar o ganho real da aplicação desse tipo de algoritmo e desenvolver um protótipo para aplicar o conceito na prática. Para viabilizar o projeto, a seguinte metodologia foi adotada.

3.1 Topologia do Estudo de Caso

Seguindo os estudos abordados na revisão bibliográfica, a topologia do sistema implementado tanto no software de simulação MATLAB/SIMULINK®, como também na prática, está exemplificada na Fig. 4.

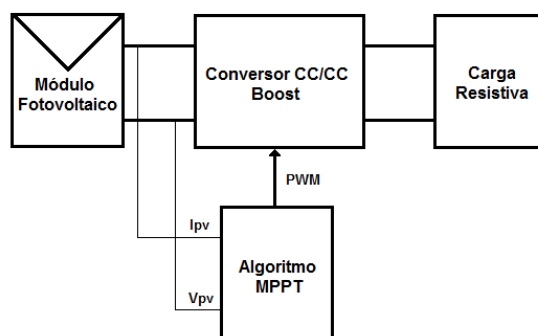


Figura 4 - Topologia do estudo de caso.

3.2 Modelagem do Sistema Fotovoltaico

A modelagem do sistema fotovoltaico é baseada na curva de corrente em função da tensão (I-V) de uma célula fotovoltaica (Fig. 1a), a qual pode ser obtida através de um conjunto de equações (Kumar, 2012), desde que sejam conhecidas as características dos componentes elétricos que representam o seu circuito elétrico equivalente (Fig. 2). Então, se faz necessário analisar as características técnicas das células, ou módulos fotovoltaicos, que são utilizados no desenvolvimento desse trabalho. O módulo fotovoltaico a ser utilizado é o modelo SY-60M, do fabricante Shenzhen Suoyang New Energy, que possui 36 células de silício monocristalino. Suas principais características técnicas são demonstradas na Tab. 1, sendo aferidas pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LABSOL. Para a modelagem do sistema, se faz necessária a análise da Fig. 2, onde a corrente da célula fotovoltaica é obtida através da corrente fotogerada I_{fv} , da corrente do diodo I_D e da corrente da resistência em paralelo I_{Rp} . Para os cálculos são atribuídas as constantes definidas na Tab. 2.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo SY-60M para a condição padrão (irradiância de 1000 W/m², temperatura de célula de 25 °C e espectro AM 1,5).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potência	60 W
Tensão de Máxima Potência	18,53 V
Corrente de Máxima Potência	3,59 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	22,65 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	3,80 A
Coefficiente de Temperatura (Ki)	1,15x10 ⁻² A/K

Tabela 2 - Constantes e referências para os cálculos

REFERÊNCIAS	VALOR
Temperatura ambiente de referência (T _{ref})	25°C
Temperatura ambiente (T _{amb})	25°C
Constante de Boltzmann (k)	1,38 x 10 ⁻²³ J/K
Carga elementar do elétron (q)	1,602 x 10 ⁻¹⁹ C
Fator de idealidade do diodo (a)	1,25
Energia de gap (E _g)	1,12 eV

A temperatura da célula T_{cel} é calculada em função da temperatura ambiente T_{amb} , a irradiância solar G e a temperatura nominal de operação da célula T_{noc} . Para avaliar os impactos da temperatura na curva I-V e comparar a simulação com a Fig. 1c, calculou-se os valores de α_i e α_v para temperaturas específicas (25, 50 e 75°C). Como os fabricantes dos módulos fotovoltaicos não disponibilizam alguns dados intrínsecos do modelo equivalente, torna-se necessária a análise de imagem da curva I-V no software MATLAB® para identificação do valor aproximado das resistências R_s e R_p e assim ser possível simular o modelo.

Com essas informações, já é possível realizar a modelagem que representa o módulo fotovoltaico diretamente no SIMULINK®. As constantes e referências foram salvas em script no MATLAB® e o modelo foi desenvolvido em função da irradiância solar G , tendo como saída os valores de tensão, corrente e potência, conforme mostra a Fig. 5.

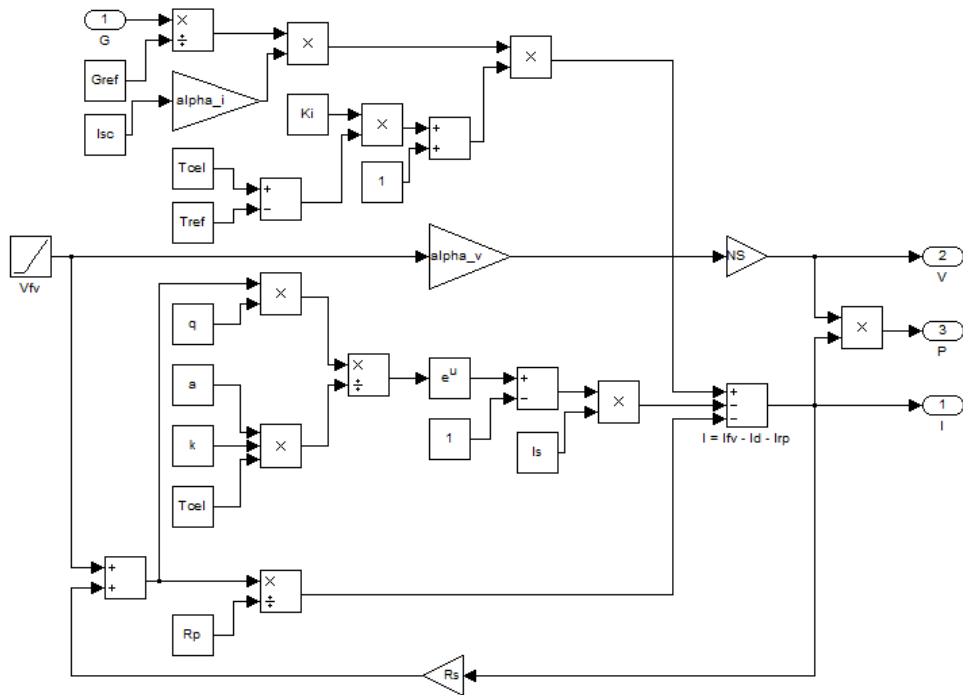


Figura 5 - Modelagem do módulo fotovoltaico modelo SY-60M.

Para que fosse possível conectar o modelo equivalente do módulo fotovoltaico aos componentes eletrônicos da simulação, foram necessárias algumas adaptações, como a inserção de uma fonte de corrente controlada pelo valor gerado pelo modelo e a realimentação da tensão medida na fonte de corrente, afim de garantir um comportamento dinâmico do arranjo. Além disso, foi modelado um conversor CC/CC com topologia *Boost* e também o algoritmo P&O descrito na Fig. 3.

Após a modelagem individual de todas as etapas, pode-se fazer a junção das mesmas e criar um ambiente de simulação integrado, conforme mostra a Fig. 6. Os sinais de tensão e corrente provenientes do módulo fotovoltaico e da carga são multiplicados para descobrir a potência e inseridos na janela de monitoração. Para que seja possível observar a resposta do sistema às variações na irradiância solar, divide-se o valor de G por 10 (adequar à escala) e coloca-se o mesmo para a monitoração também.

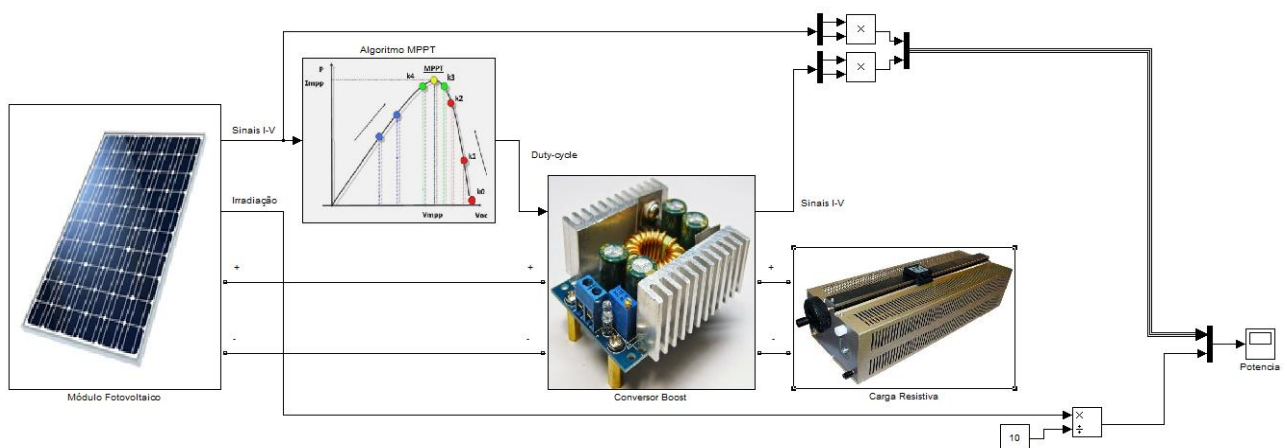


Figura 6 - Modelagem do sistema fotovoltaico no MATLAB/SIMULINK®.

3.3 Protótipo Experimental

Para aplicar o conceito estudado na prática, optou-se por desenvolver um protótipo experimental, aplicando a topologia do conversor *Boost* e implementando o algoritmo MPPT em linguagem C para embarcar em um microcontrolador. No projeto do hardware utilizou-se o PIC18F4550, ligado a um sensor de corrente de Efeito *Hall* ACS712 do fabricante *Allegro Microsystems* e um circuito divisor de tensão, ambos com filtro ativo passa-baixa para eliminar ruídos. A saída *PWM* do microcontrolador foi conectada ao conversor *Boost* com *duty-cycle* operando de 10 a 50%, afim de se extrair a maior eficiência do módulo fotovoltaico. É importante salientar que a utilização da carga resistiva, se deve ao fato da disponibilidade em laboratório de um reostato para potências elevadas. Além disso, a análise do impacto de cargas indutivas e capacitivas não fazem parte deste estudo.

3.4 Topologias para Execução dos Testes

Os testes do protótipo experimental foram divididos em duas partes, sendo a primeira para verificar a eficiência do conversor *Boost* e validar o programa desenvolvido para o microcontrolador *PIC* (Fig. 7a). A segunda parte foi à verificação técnica do protótipo conectado ao módulo fotovoltaico, sendo o mesmo instalado em frente ao laboratório C02 110 da Unisinos, orientado ao norte geográfico e com ângulo de inclinação de 34° em relação ao plano horizontal, conforme mostra a Fig. 7b e a Fig. 7c. Nesse local, a incidência direta de raios solares, no período do ensaio, ocorreu das 10 h às 17h30min.

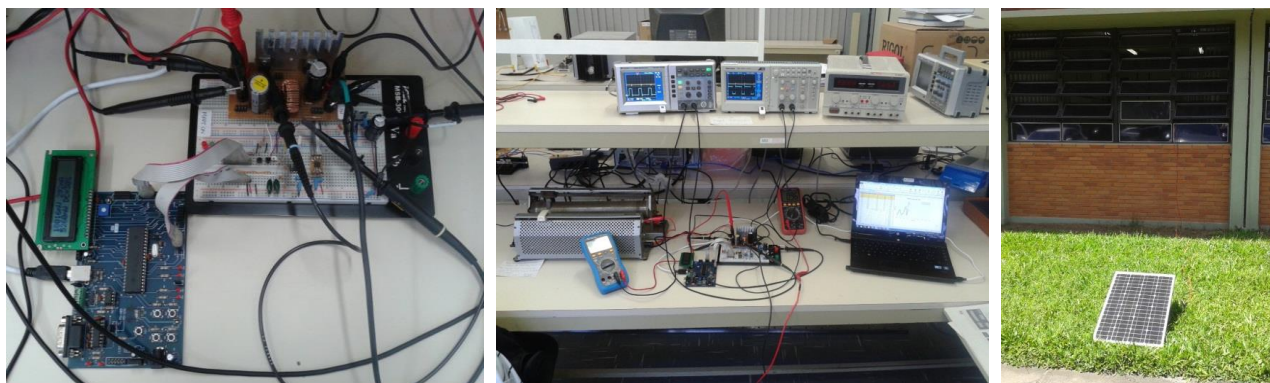


Figura 7 – Protótipo experimental (a), Bancada de testes (b), Módulo fotovoltaico (c).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de resultados foi obtida por meio de testes realizados, tanto no modelo teórico como na prática, seguida de uma discussão dos mesmos.

4.1 Resultados do Modelo

A modelagem do módulo fotovoltaico, do conversor *Boost* e do algoritmo MPPT de Perturbação e Observação (P&O) já foram validados durante a metodologia. Inclusive a resposta do modelo equivalente da célula fotovoltaica também já foi confrontada com os dados fornecidos pelo fabricante. Para a verificação do modelo de controlador do ponto de máxima potência estudado, foram propostos alguns estudos de caso, sendo o principal simulando um sombreamento em um módulo fotovoltaico, com o valor de irradiância solar G inicial de 1000 W/m^2 , reduzindo para 800 W/m^2 , depois 600 W/m^2 , após retornando a origem. Essa curva ocorre durante o período da simulação (0,5 segundos) e pode ser observada na Fig. 8a, através da linha cor verde. A linha na cor amarela representa a potência gerada pelo módulo com a aplicação do algoritmo MPPT, sendo a linha na cor rosa a potência entregue à carga. A linha na cor azul *cyan* representa a potência gerada pelo módulo sem a aplicação do algoritmo MPPT (*duty-cycle* fixo), sendo a linha na cor vermelha a potência entregue à carga. O regime transitório observado no início da simulação representa o módulo partindo para a potência máxima, porém sem carga. Quando o conversor chaveado começa a operar corretamente, a potência gerada cai para valores de acordo com a carga aplicada. A cada variação no valor da irradiância ocorre um transitório na potência gerada pelo módulo, mas que devido à rápida atuação do algoritmo MPPT, pouco se percebe na potência entregue à carga. No regime final da simulação, pode-se verificar um acréscimo de 73,22% tanto na potência gerada pelo módulo, como também na potência entregue à carga (como não existem perdas por dissipação térmica na simulação, a eficiência fica próxima de 100%). Ou seja, com a utilização do algoritmo de MPPT está se utilizando 18,6 W a mais do módulo fotovoltaico e entregando 18,1 W a mais para a carga do sistema.

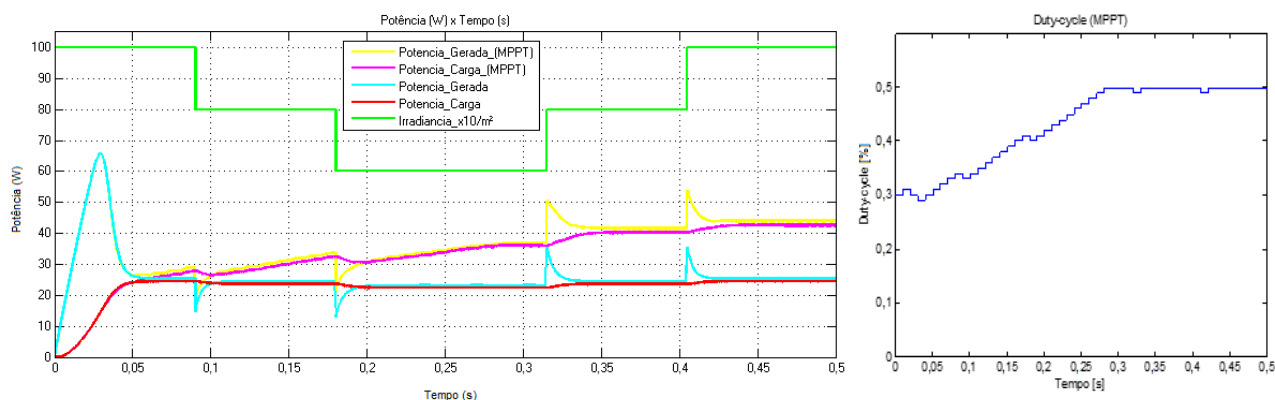


Figura 8 - Simulação de sombreamento no módulo (a), Comportamento do *duty-cycle* (b).

Observa-se na Fig. 8b que o algoritmo detecta as variações na irradiação solar e busca o ponto de máxima potência. Quando a derivada da curva se torna positiva, o algoritmo gera uma rampa de incrementos até o valor máximo e permanece com *duty-cycle* de 50%, variando apenas quando ocorre um transitório no nível de irradiação solar, mas logo estabilizando.

4.2 Resultados Experimentais em Bancada

Para verificar a eficiência do conversor projetado, foi fixada uma tensão de entrada na fonte de alimentação linear, igual a 22,65 V, ou seja, a tensão de circuito-aberto do módulo – máxima tensão gerada. Após, o *duty-cycle* do sinal *PWM* foi sendo incrementado, de 30% a 50%, e os valores da corrente de entrada e tensão de saída foram devidamente registrados para calcular a eficiência do circuito. Após a montagem do gráfico, concluiu-se que a eficiência do *Boost* varia de 75% a 67% (carga e *duty-cycle* máximos).

4.3 Resultados Experimentais com o Módulo Fotovoltaico

O dia utilizado para testes do protótipo experimental começou com temperatura de, aproximadamente, 14°C às 6 horas, se estabelecendo em 18,1°C às 10 h. Havia bastante nebulosidade no início da manhã, sendo que o Sol apareceu com mais intensidade somente a partir das 11 h. O pico de temperatura foi de 24,7°C e ocorreu às 16h15min. Os dados do protótipo sem o algoritmo MPPT (*duty-cycle* fixo em 30%) e com o algoritmo MPPT (*duty-cycle* variando de 10% a 50%) foram obtidos simultaneamente. A partir das 10 h, a cada intervalo de 15 minutos, as medições eram realizadas e armazenadas em uma planilha. O ensaio foi concluído às 17h30min, pois após este horário já não se têm mais incidência de raios solares sobre os módulos devido à sombra dos prédios e árvores no local.

Através dos dados práticos obtidos nesse dia, pode-se constatar que com a utilização do algoritmo MPPT, foi possível obter um acréscimo médio de potência gerada pelo módulo fotovoltaico, na ordem de 56%. Isso ocorre, pois nos momentos de baixa radiação solar, o algoritmo identifica a baixa geração de energia e reduz o *duty-cycle* do conversor *Boost*, fazendo que estresse menos o módulo. Do mesmo modo, quando o nível de radiação solar é elevado, o algoritmo MPPT eleva o valor do *duty-cycle* ao máximo, pois percebe que o módulo pode gerar mais energia. Os picos de rendimento (até 97% superior ao sistema sem a execução do algoritmo) justificam-se pelos altos níveis de irradiação solar naquele instante (entre 1111 e 1130 W/m²). A Fig. 9a mostra o gráfico criado a partir dos dados adquiridos durante o dia, onde pode-se perceber que a potência gerada pelo painel é muito maior quando o algoritmo MPPT está sendo executado.

Seguindo o mesmo comportamento que a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico, a potência entregue à carga também é superior quando o algoritmo MPPT está sendo executado (Fig. 9b). Através dos dados práticos obtidos nesse dia, pode-se constatar que, com a utilização do algoritmo, foi possível obter um acréscimo médio de 50% na potência entregue à carga. O valor foi um pouco abaixo do anterior, devido à redução da eficiência do conversor *Boost* para potências elevadas.

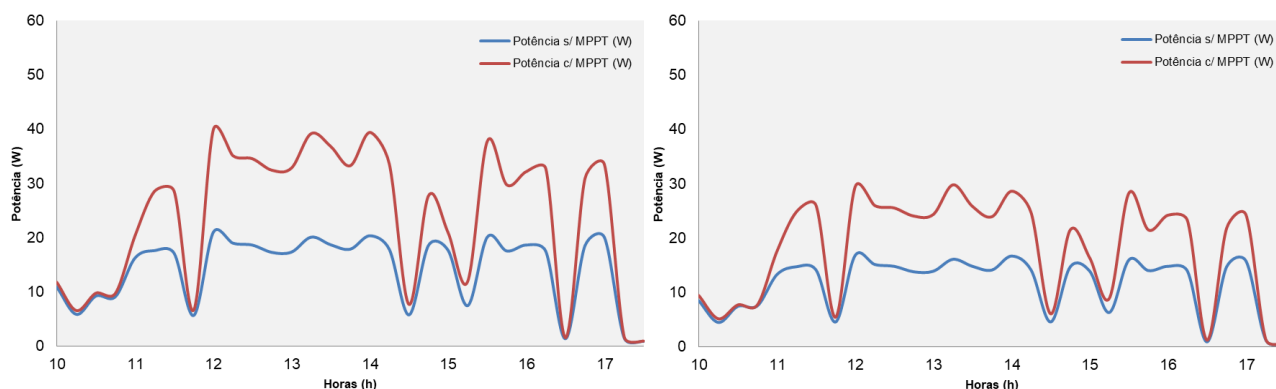


Figura 9 - Gráfico da potência gerada pelo módulo (a), Gráfico da potência entregue à carga (b).

Após a realização do ensaio, foram adquiridos os dados da estação meteorológica da Unisinos, a fim de se comparar o desempenho do protótipo experimental. Foram coletados dados de irradiância solar (W/m^2) e temperatura ($^{\circ}C$), a cada 15 minutos, sendo o mesmo intervalo de tempo utilizado nos testes. A partir do gráfico da variação da irradiância no tempo, pode-se constatar que o comportamento foi muito semelhante ao protótipo, apresentando os mesmos picos entre 12 h e 14h, conforme mostra a Fig. 10. É importante ressaltar que a estação meteorológica está localizada a uma distância de aproximadamente 40 metros do local do experimento, adquirindo dados de irradiância solar na horizontal, sendo que os ensaios foram realizados com o módulo fotovoltaico orientado para o norte geográfico, com ângulo de inclinação de 34° . Contudo, a análise realizada no presente trabalho é qualitativa, ou seja, somente para verificar o comportamento do mesmo, não sendo necessária à correção do ângulo. Algumas diferenças de comportamento podem ser observadas às 11h45min, 14h30min e 16h30min, oriundas de um sombreamento no protótipo, o qual não ocorreu na estação.

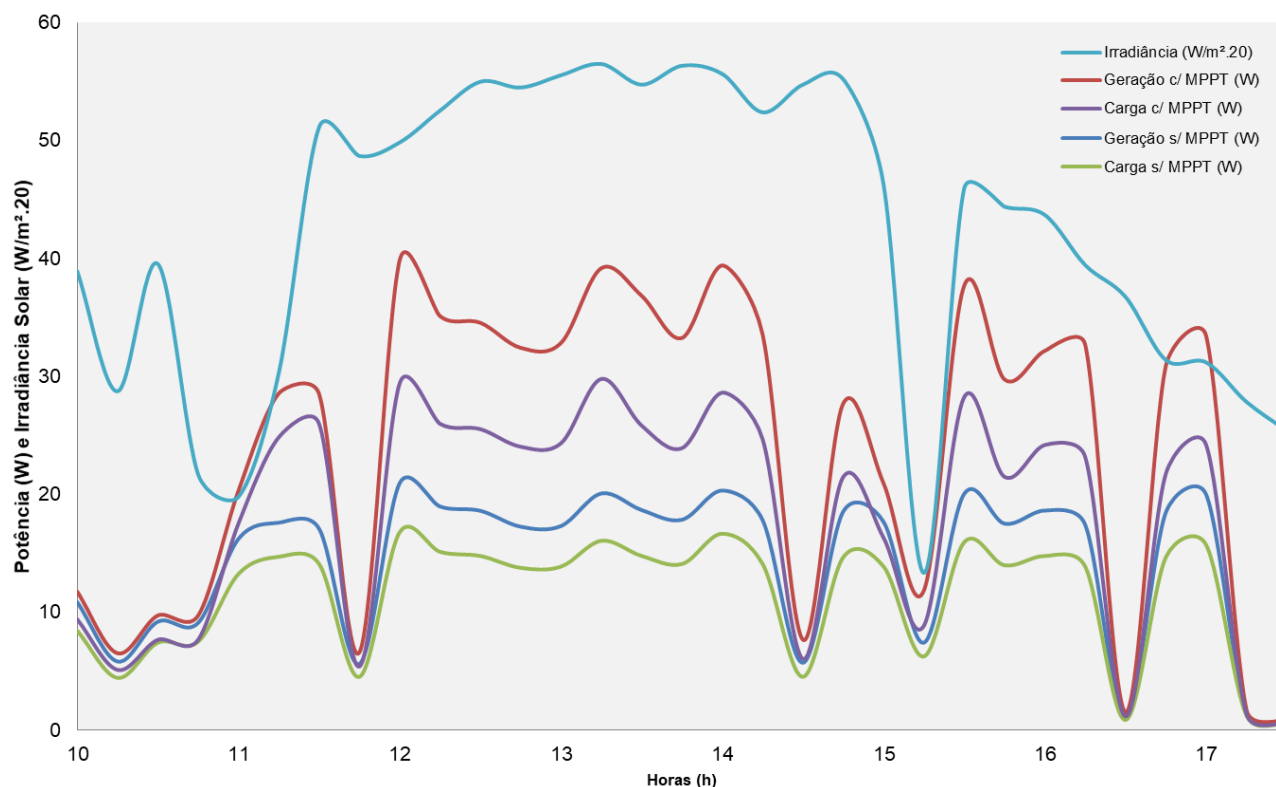


Figura 10 - Gráfico comparando o ensaio com os dados da estação meteorológica.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal do trabalho foi alcançado mediante a comprovação da maior eficiência do sistema com a aplicação do algoritmo MPPT, em comparação ao sistema que não possui controle sobre a razão cíclica do conversor *Boost*, principalmente em dias com muitas nuvens e até mesmo nublados, quando o módulo fornece pouca potência. O sistema fotovoltaico modelado, com a aplicação do algoritmo, apresentou um ganho expressivo de eficiência de até 73,22% na potência gerada pelo módulo e entregue à carga. Nos ensaios práticos, a aplicação do MPPT extraiu, em média, 56% a mais de energia do módulo fotovoltaico e entregou 50% a mais de potência para a carga. Em determinadas situações, como às 13h15min, o ganho na geração de potência chegou há um pico de diferença de 19,1 W,

que representa 32% da potência máxima do módulo fotovoltaico. Além disso, os resultados do protótipo experimental foram muito semelhantes ao modelo simulado, principalmente nos períodos de elevada irradiância solar em que a potência gerada foi de, aproximadamente, 40 W em ambos os casos. A partir do desenvolvimento do projeto, comprovou-se que o algoritmo de Perturbação e Observação (P&O) é simples de se implementar e pode oferecer resultados significativos na eficiência e na energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Além disso, o método possui estrutura de controle simples e necessita de poucos parâmetros para funcionar (sinais de tensão e corrente gerados pelo módulo). Outra vantagem é o fato de não estar vinculado às características de um módulo solar específico para o processo de rastreamento, ou seja, pode ser aplicado a qualquer tipo de módulo fotovoltaico. Para fins demonstrativos de eficiência não se considerou o consumo elétrico do protótipo, tendo em vista que em sistemas com maiores proporções são colocados inversores para corrente alternada que necessitam de um conversor CC/CC interno para elevar o nível de tensão dos módulos. Assim como também em aplicações com módulos ligados a baterias, as quais necessitam de um conversor para controlar a tensão de carga (importante ressaltar que bastam algumas pequenas alterações no projeto para que o protótipo desenvolvido possa executar as funções de um controlador de carga).

Enfim, conclui-se que o presente trabalho se apresenta como uma forma eficaz para o aumento da geração de potência elétrica utilizando sistemas fotovoltaicos, fazendo com que seja possível um melhor aproveitamento da energia solar captada pelo módulo. Dentro deste contexto, o estudo apresentado surge como uma alternativa viável para utilização em sistemas isolados (*Off-Grid*), como zonas rurais ou locais em que a extensão da rede elétrica apresenta-se inviável; ou também para conexão à rede elétrica (*Grid-Tie*), aumentando a energia injetada na rede, visto que com o advento das resoluções N.º. 482 e N.º. 687 da ANEEL, muitas unidades de geração serão conectadas ao sistema de distribuição e os índices dos sinais gerados deverão estar dentro dos limites especificados pelo órgão regulador.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N.º. 482, de 17 de abril de 2012. Brasília: ANEEL, 2012.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N.º. 687, de 24 de novembro de 2015. Brasília: ANEEL, 2015.
- Brito, M. A. G., Junior, L. G., Sampaio, L., Canesin, C. Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (Induscon), p. 1-6, São Paulo, 2010.
- Carvalho, E. P. Uma Nova Abordagem de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2012.
- Cupertino, A. F., Resende, J. T., Pereira, H. A., Seleme Jr, S. I. A Grid-Connected Photovoltaic System with a Maximum Power Point Tracker using Passivity-Based Control applied in a Boost Converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012.
- Datasheet, Datasheet do Microcontrolador PIC18F4550, 2006. 430 p. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>>. Acesso em: 15 out 2017.
- Datasheet, Datasheet do Sensor de Corrente Baseado no Efeito Hall ACS712, 2007. 14 p. Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>>. Acesso em: 15 out 2017.
- Faranda, R., Leva, S., Maugeri, V. MPPT Techniques for PV Systems: energetic and cost comparison. IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, p. 1-6, 20-24, 2008.
- Femia, N. et al. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 20, n. 4, p. 963-973, 2005.
- IEA, International Energy Agency. World Energy Outlook 2012. Paris: IEA Publications, 2012.
- IEA, International Energy Agency. World Energy Outlook 2012 – Renewable Energy Outlook. Paris: IEA Publications, 2012.
- Kumar, M. Simulation and Analysis of Grid Connected Photovoltaic System with MPPT. Electr. Dept., N.I.T., Kurukshetra, India. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012.
- Luque, A., Hegedus, S. Handbook of Photovoltaic and Engineering. 2. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- Villalva, M. G. Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia e de Computação, Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 2010.

APPLICATION OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) ALGORITHM FOR PHOTOVOLTAIC PANELS

Abstract. *This work presents the application of the maximum power point tracking (MPPT) algorithm for photovoltaic panels. The system was modeled and simulated based on the specific characteristics of a PV module and has also developed a prototype for application of the concept studied, based on PIC18F4550 microcontroller, a DC/DC Boost converter and electronic circuits that monitor, effectively, the voltage and the current of the solar panel for further calculation and analysis of power generated. To achieve the study goals, the system was modeled using the Perturb and Observe (P&O) algorithm, a traditional method and studied by several authors. However, the main difference of this research is on the practical application of the concept through an experimental prototype, which allows to perform tests to validate the results and to compare, subjecting it to the same working conditions; the efficiency of the system operating with and without the algorithm. Finally, the motivation for the development of this project is to present the importance of using MPPT algorithms in DC/DC converters to increase 73% the power generated by the module and always keep a constant voltage that charges batteries and to be a viable alternative at isolated systems (Off-Grid), as rural or local areas where extension of power grid presents unfeasible; or also in systems for power grid connection (Grid-Tie), increasing the energy injected in the grid, because after the ANEEL resolutions no. 482 and 687, that many power generation units will be connected to the distribution system and the indices of the generated signals must be within the limits specified by the energy regulator.*

Key words: *Maximum Power Point Tracking (MPPT). Algorithms. DC/DC Converters.*