

**GESEP – Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência**



***Título:***

COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

***Autor:***

LUAN PETERLE CARLETTE

***Orientador:***

Prof. Dr. Denilson Eduardo Rodrigues

***Membros:***

Gerson Ovidio Luz Pedruzi

M. Sc. André Luis Carvalho Mendes

***Aprovação:***

3 de julho de 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUAN PETERLE CARLETTE

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA  
CARREGAMENTO DE BATERIAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

VIÇOSA  
2015

LUAN PETERLE CARLETTE

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA  
CARREGAMENTO DE BATERIAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Denilson Eduardo Rodrigues.

Co-orientador: Prof. Heverton Augusto Pereira.

VIÇOSA  
2015



**LUAN PETERLE CARLETTE**

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA  
CARREGAMENTO DE BATERIAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 3 de julho de 2015.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Denilson Eduardo Rodrigues - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Gerson Ovidio Luz Pedruzi - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**M. Sc. André Luis Carvalho Mendes - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“(...) para transformar a ciência de um objeto estranho, distante e incomensurável com a nossa vida, num objeto familiar e próximo, que não falando a língua de todos os dias é capaz de nos comunicar as suas valências e os seus limites, os seus objetivos e o que realiza aquém e além deles.”*

*Boaventura Sousa Santos*

*À minha família Luiz, Ana e Luana.*

## *Agradecimentos*

Terminar um curso de graduação pode não ser tarefa fácil e é por isso que essa vitória só foi possível graças a algumas pessoas. Agradeço aos meus pais, que sempre me incentivaram a ser um bom aluno e que me prepararam desde cedo para a Universidade. Agradeço também a minha irmã, que por ter iniciado antes a vida acadêmica, se tornou um grande exemplo de como aquele era o caminho a se seguir. Muito antes do momento da formatura chegar, naqueles dias em que tudo parecia dar errado, foi do sucesso da minha irmã que veio o sentimento de que isso tudo aqui vale a pena sim.

E como não agradecer ao GESEP que, sem dúvidas, foi um dos lugares que mais aprendi durante os últimos 5 anos. Agradeço ao Heverton, professor, amigo e conselheiro, por ter acreditado em mim todos esses anos e ter me dado a oportunidade de aprender tanto nesse grupo que acrescentou muito a minha graduação e me deu tantos amigos.

E finalmente, agradeço aos amigos tão companheiros que foram minha família em todos esses dias longe de casa, me deram forças e compartilharam comigo todos esses momentos que vou guardar para sempre.

## ***Resumo***

Em sistemas fotovoltaicos isolados é crucial que se absorva o máximo da energia disponível. Assim, para extrair a máxima potência de um painel solar, para uma dada condição climática, um algoritmo seguidor de máxima potência (MPPT) é usado. O MPPT consiste num conversor de potência que controla a tensão nos terminais do painel solar. Nesse contexto, este trabalho compara as eficiências dinâmica e instantânea de três algoritmos de MPPT propostos na literatura: Perturba e Observa (P&O), muito popular por ser simples e de fácil implementação, e em duas de suas modificações, dP - Perturba e Observa (dP-P&O) e Perturba e Observa Modificado (MP&O) aplicados a um sistema isolado. O sistema analisado contém um painel solar com potência de 48 W e um conversor *buck*, cujo ciclo de trabalho é determinado pelo cálculo do ponto de operação pelo algoritmo seguidor de máxima potência (MPPT), conectado a uma bateria. O desempenho do sistema usando os diferentes algoritmos será comparado durante variações de radiação em simulações no Simulink/Matlab e, por fim, as mesmas comparações serão feitas para um protótipo do sistema.

## *Abstract*

In photovoltaic standalone systems it is crucial to absorb most of the available energy. Thus, in order to extract the maximum power of a solar panel for a given set of climatic conditions, it is used maximum power point tracker (MPPT). The MPPT consists in a power converter which controls the solar panel voltage. In this context, this work compares the instantaneous and dynamic efficiency of three MPPT algorithms proposed in literature: perturb and observe, dP - perturb and observe and modified perturb and observe used in a photovoltaic standalone systems. The system analyzed is composed by a 48 W solar panel, a battery of 60 Ah and a charger based on a buck converter. The performance of the system using the three studied algorithm during solar irradiance variations was simulated in Simulink/Matlab and then a prototype of the system was built to be submitted to the same tests.

# *Sumário*

1	Introdução.....	14
1.1	O contexto da energia fotovoltaica .....	14
1.2	A energia fotovoltaica no Brasil .....	16
1.3	Sistemas isolados .....	16
1.3	Objetivos e Motivação .....	17
2	Revisão Bibliográfica .....	18
2.1	Painel Fotovoltaico .....	18
2.1.1	Princípio de Funcionamento.....	18
2.1.2	Modelo Equivalente de um Painel Solar .....	19
2.2	Algoritmos Seguidores de Máxima Potência.....	22
2.3	Conversor Buck .....	23
2.3.1	Modo de Condução Contínuo (MCC) .....	23
2.3.2	Modo de Condução Descontínuo (MDC).....	24
2.3.3	Modelagem do Conversor Buck .....	25
2.4	Baterias .....	28
2.5	Microcontroladores .....	29
3	Metodologia .....	30
3.1	Componentes do Sistema.....	30
3.2	Seguidor de Máxima Potência .....	32
3.2.1	Perturba e Observa (P&O).....	33
3.2.2	dP - Perturba e Observa (dP-P&O) .....	33
3.2.3	Perturba e Observa Modificado (MP&O) .....	34
3.3	Eficiência Dinâmica e Eficiência Instantânea.....	35
3.4	Aquisição de Dados .....	36
3.5	Circuito de Chaveamento do Buck .....	37
3.6	Sistema Carregador de Baterias .....	38
4	Resultados e Discussões.....	39
4.1	Simulações .....	39
4.1.1	Resultados para a rampa de radiação de 10-50% .....	39
4.1.2	Resultados para a rampa de radiação de 30-100% .....	41

4.1.3	Eficiência Dinâmica e Eficiência Instantânea .....	43
-------	--	----

## *Lista de Figuras*

Figura 1 – Evolução da quantidade acumulada, em GW, de módulos fotovoltaicos instalados no mundo [7].	15
Figura 2 – Evolução do preço médio do módulo fotovoltaico na Europa de 2000 a julho de 2011 [8].	15
Figura 3 – Mapa mundi solarimétrico [9].	16
Figura 4 – Proporção do mercado on e off-grid de geração fotovoltaica entre 1993 e 2013 [7].	17
Figura 5 – Modelo simplificado de um painel fotovoltaico [11].	19
Figura 6 – Algoritmo do método para ajustar a curva $I \times V$ [14].	21
Figura 7 – Curvas características de um PV	22
Figura 8 – Topologia básica de um conversor <i>buck</i> .	23
Figura 9 – Tensão sobre uma indutância em regime [20].	24
Figura 10 – Sistema carregador de baterias	25
Figura 11 - Circuito equivalente para o dispositivo semicondutor em saturação.	26
Figura 12 - Circuito equivalente para o dispositivo semicondutor em corte.	27
Figura 13 – Fluxograma do algoritmo P&O	33
Figura 14 – Medida da potência entre dois períodos de amostragem [24].	34
Figura 15 – Fluxograma do algoritmo MP&O.	35
Figura 16 – Sensor de tensão projetado [11].	36
Figura 17 – Circuito de chaveamento do CI [11].	37
Figura 18 – Conversor <i>buck</i> com circuitos do PIC e IR2104.	38
Figura 19 – No sentido horário começando do topo: circuito do PIC com controle de MPPT, sensor de corrente, IC para chaveamento dos IGBT's.	38
Figura 20 – Perfis de radiação para simulação.	39
Figura 21 – Comportamento para a potência do PV para os algoritmos estudados para perfil 1 de radiação.	40
Figura 22 – Tensão no barramento do PV para o perfil 1 de radiação.	40
Figura 23 – Corrente do PV para perfil 1 de radiação.	41
Figura 24 - Comportamento para a potência do PV para os algoritmos estudados para perfil 2 de radiação.	42
Figura 25 – Tensão no barramento do PV para o perfil 2 de radiação.	42
Figura 26 – Corrente do PV para perfil 2 de radiação.	43
Figura 27 – Eficiência instantânea para os três algoritmos estudados e perfil 1 de radiação.	44
Figura 28 – Eficiência instantânea para os três algoritmos estudados e perfil 2 de radiação.	44

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 – Parâmetros dos painel Kyocera SM48KSM utilizado nas simulações e experimentos.....	30
Tabela 2 – Parâmetros da bateria utilizada nas simulações e experimentos. ....	31
Tabela 3 – Parâmetros dimensionados do conversor <i>buck</i> .....	32
Tabela 4 – Eficiências dinâmicas para os dois perfis de radiação.....	43

# ***1 Introdução***

## ***1.1 O contexto da energia fotovoltaica***

A emissão global de carbono devido ao uso de combustíveis fósseis cresceu significativamente desde 1900. As emissões cresceram aproximadamente 16 vezes entre 1900 e 2008, enquanto a população mundial menos que quadruplicou [1]. Acredita-se que aproximadamente 26% dessas emissões estejam ligadas diretamente a produção de energia na queima de carvão e gás natural, por exemplo. A taxa atual de queima desses combustíveis já é insustentável e por isso é necessário investir em soluções não poluentes que substituam a necessidade dessa queima.

Na contramão desta realidade, em resposta ao nível dos reservatórios das hidrelétricas, que começaram a baixar no fim do primeiro semestre de 2012, segundo os relatórios da ONS, a solução adotada para manter o suprimento à crescente demanda por energia foi o acionamento de termelétricas movidas a combustíveis fósseis. O movimento mudou a matriz energética brasileira. A média mensal do acumulado de janeiro a julho de 2012 mostra a geração por hidrelétricas como responsável por 89% da energia produzida, enquanto as térmicas responderam por 7,3%. Dois anos depois, na mesma comparação, as térmicas triplicaram a presença na matriz, para 21,7% do total. As hidrelétricas caíram para 74,6% [2].

É evidente a crescente necessidade da diversificação da matriz energética. No Brasil, desde a instituição em 2002 do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), vem se verificando um interesse crescente pelas fontes de energia eólica, atingindo em maio de 2015 pouco mais de 5.900 MW instalados [3]. Já em relação à energia solar fotovoltaica o país ainda engatinha, em 2012 a Resolução Normativa nº 482 da ANEEL incentivou a criação de micro e minigerções distribuídas, permitindo as unidades consumidoras venderem seus excedentes para a concessionária [4]. Ainda assim, o elevado custo dos projetos não deixou a energia fotovoltaica decolar, correspondendo ainda a 0,01% da matriz brasileira.

Mas há razões para acreditar que o momento da energia solar fotovoltaica é agora. Em 2014, pela primeira vez a energia solar foi incluída num leilão de energia e atraiu investimentos que serão utilizados na construção de 31 empreendimentos de energia solar totalizando 889,6 MW. A contratação de energia solar atingiu um preço de menos de US\$

90/MWh, deixando o Brasil entre os países com menor preço para essa fonte [5]. Também em 2014, 44 GW dessa fonte foram instalados no mundo, contra 39.6 GW instalados em 2013. Já para 2015 são esperados investimentos de até 155 bilhões de dólares neste setor e uma potência instalada de aproximadamente 55 GW [6]. Na Figura 1, é possível notar a evolução da instalação dessa fonte no mundo.

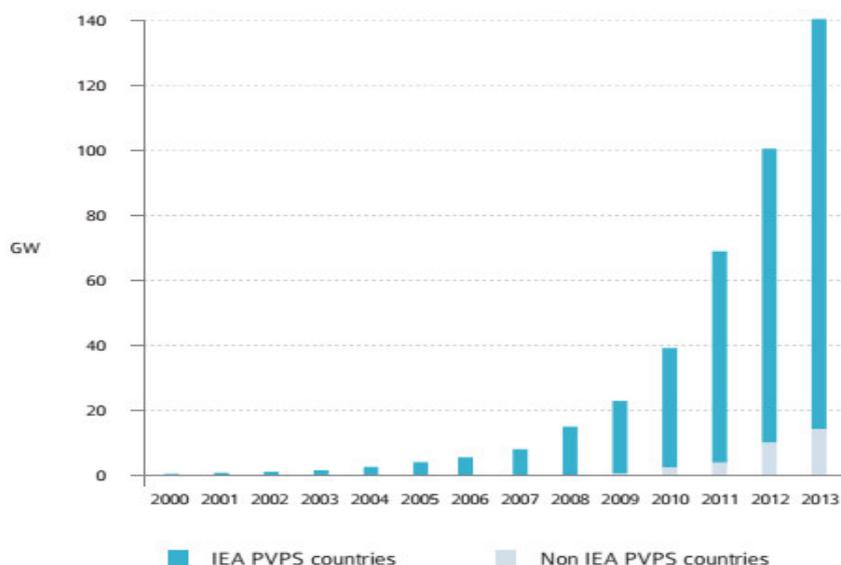


Figura 1 – Evolução da quantidade acumulada, em GW, de módulos fotovoltaicos instalados no mundo [7].

Além disso, o preço total do sistema solar fotovoltaico tem caído por décadas e está atingindo agora um valor competitivo. A Figura 2 mostra a queda de preço desse sistema na Europa, atingindo após 10 anos um preço 70% menor [8].

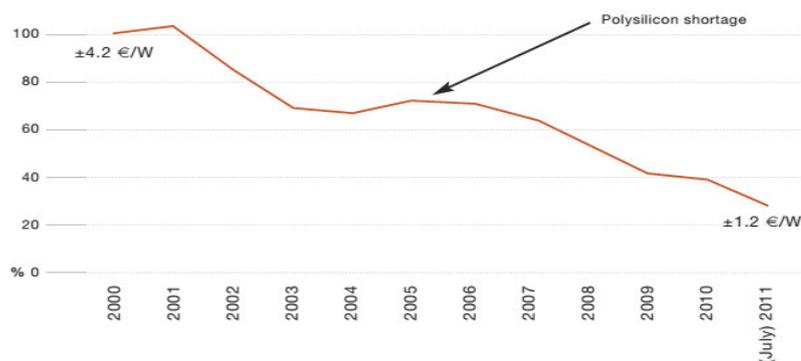


Figura 2 – Evolução do preço médio do módulo fotovoltaico na Europa de 2000 a julho de 2011 [8].

## 1.2 A energia fotovoltaica no Brasil

Atualmente o Brasil possui 317 empreendimentos de energia solar fotovoltaica, totalizando 19.179 kW, e mais seis com construção autorizada, que acrescentarão 128.488 kW a matriz brasileira [3].

O país que detém o recorde de potência instalada é a Alemanha, com um quarto do total mundial (pouco mais de 35 GW) [7], e observando a Figura 3 percebemos que os países que mais concentram geração fotovoltaica (a Europa Ocidental em geral) recebem, na média anual, menos radiação do que toda a extensão do território brasileiro.

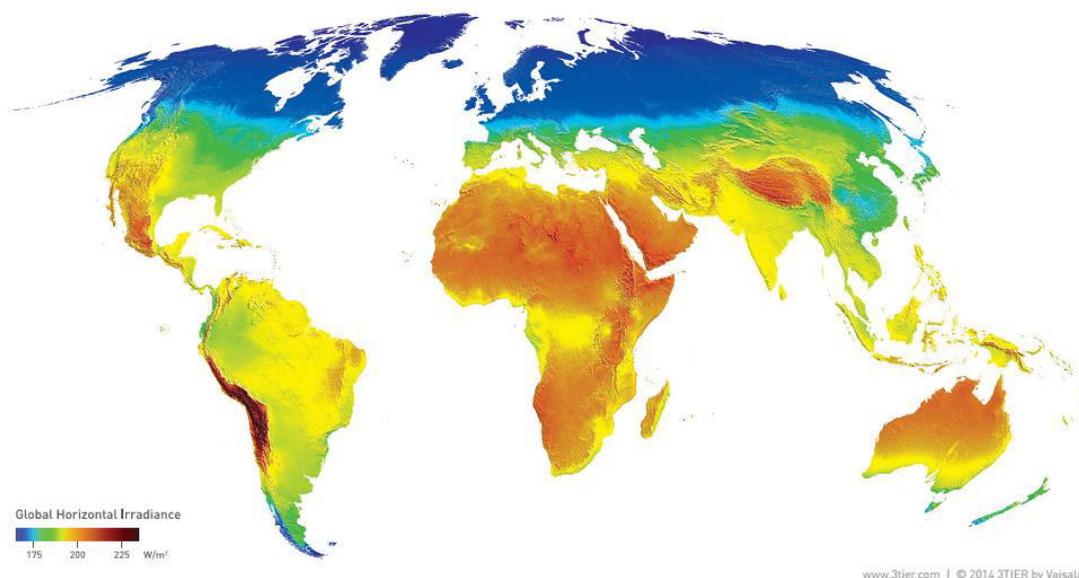


Figura 3 – Mapa mundi solarimétrico [9].

## 1.3 Sistemas isolados

Uma série de incentivos em aplicações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e seu rápido crescimento tornam cada vez menor o investimento em aplicações isoladas da rede (*off-grid*), Figura 4. Estes são majoritariamente aplicados em sistemas de comunicação, lazer, eletrificação rural ou sistemas que geram energia para objetivos bem específicos [7]. No entanto, sistemas desse tipo com capacidade de armazenamento (banco de baterias, por exemplo) continuam sendo uma alternativa para lugares remotos e comunidades isoladas, e é deste tipo de sistema que este trabalho trata.

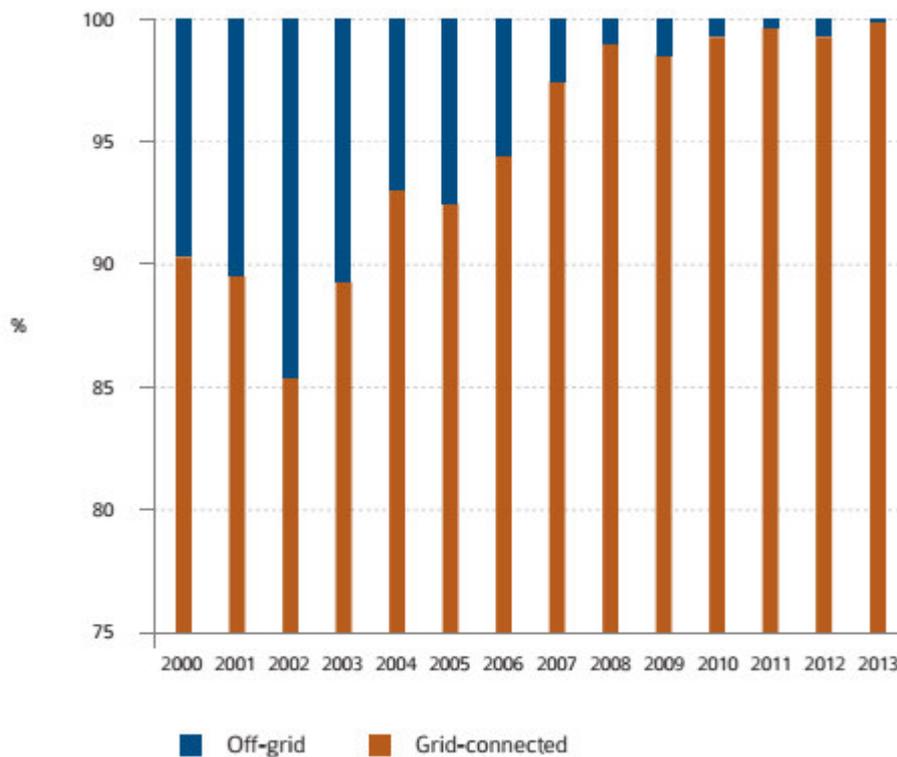


Figura 4 – Proporção do mercado on e off-grid de geração fotovoltaica entre 1993 e 2013 [7].

### 1.3 Objetivos e Motivação

O objetivo deste trabalho é simular um carregador de baterias que contém um painel solar com potência de 48 W e um conversor *buck*, cujo ciclo de trabalho é determinado pelo cálculo do ponto de operação pelo algoritmo seguidor de máxima potência (MPPT), conectado a uma bateria. O desempenho do sistema usando os diferentes algoritmos será comparado em simulação e, por fim, as mesmas comparações serão feitas para um protótipo do sistema.

A motivação desse trabalho se deve ao grande potencial do Brasil na geração através dessa fonte, além dos vários indicadores de que a energia fotovoltaica conta com mais incentivos e preços competitivos e que, finalmente, seu momento tenha chegado.

## 2 *Revisão Bibliográfica*

### 2.1 *Painel Fotovoltaico*

Dispositivos fotovoltaicos convertem luz solar diretamente em energia elétrica e não devem ser confundidos com outras tecnologias como a solar térmica, por exemplo, usada para aquecimento. As partes principais de um sistema fotovoltaico de potência são: o módulo fotovoltaico, composto por várias células, o suporte para o módulo (ou conjunto de módulos), um inversor ou conversor, um banco de baterias e uma unidade de controle [7].

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são o silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível. Células p-Si têm eficiência comercial entre 16-24%, as m-Si, mais baratas, têm eficiência por volta de 14-18% [10].

#### 2.1.1 **Princípio de Funcionamento**

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução “vazia” (sem elétrons) na temperatura do zero absoluto (0 K) [11]. A separação entre duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores, denominada de banda proibida (*bandgap* ou *gap*) e representado por  $E_g$  pode atingir até 3 eV (elétron-volt), diferenciando estes materiais dos materiais considerados isolantes, onde a banda proibida supera este valor [10].

Para construir um diodo, por exemplo, é necessário introduzir de forma controlada impurezas no semicondutor, processo conhecido como dopagem, que consiste na introdução de pequenas quantidades de outros elementos que mudam drasticamente as propriedades elétricas do material semicondutor. Existem dois tipos de dopagem, as do tipo *n* e *p*, em que sobram elétrons e lacunas, respectivamente. Na interface entre dois tipos de dopagem, o excesso de cargas positivas e negativas na junção das regiões *n* e *p* produz um campo elétrico que impede a passagem de elétrons do lado *n* para o lado *p*, assim como impede a passagem de lacunas do lado *p* para a *n*. formando uma região denominada zona de depleção ou junção *pn* [10].

Pode-se entender uma célula fotovoltaica como um diodo com a junção *pn* exposta à luz [12]. Para criar uma corrente na célula é necessária uma energia externa, algo que energize os elétrons na região do material do tipo *p* para que eles entrem na região de depleção. O sol é uma excelente fonte de energia para exercer essa função, uma vez que, um elétron gerado pela luz solar na vizinhança da camada de depleção passa facilmente para o material dopado do tipo *n*, gerando corrente elétrica.

Cada célula sozinha produz pouca potência normalmente entre 1 a 2 W, portanto, em aplicações práticas e comerciais costuma-se conectar várias células em série, para aumentar a tensão produzida, e/ou paralelo, para que a corrente produzida aumente, formando assim um módulo ou painel fotovoltaico, que também podem ser postos em série ou paralelo para aumentar ainda mais a potência produzida [11].

### 2.1.2 Modelo Equivalente de um Painel Solar

Muitos trabalhos na literatura apresentam propostas de métodos para modelar e simular dispositivos fotovoltaicos com base no modelo tradicional de um único diodo. Existe um modelo simplificado de painel fotovoltaico (PV) mostrado na Figura 5.

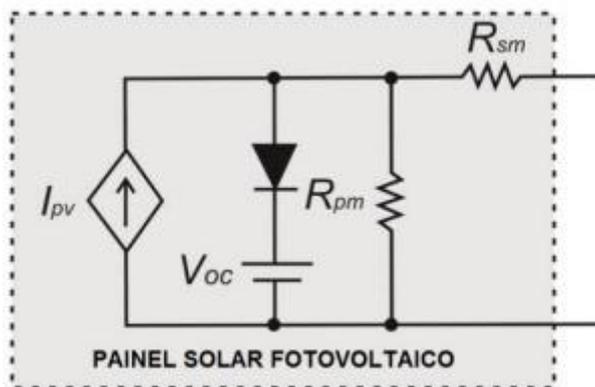


Figura 5 – Modelo simplificado de um painel fotovoltaico [11].

$V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto e  $I_{pv}$  é uma fonte de corrente constante. A resistência série  $R_s$  é a soma de diversas resistências estruturais do dispositivo. A resistência série é basicamente a soma das resistências de contato ôhmico do semicondutor *p* com a base de metal inferior, das resistências dos corpos dos semicondutores *p* e *n*, das resistências de contato da camada *n* com a grade de terminais metálicos superior e as resistências próprias dos terminais metálicos. A resistência  $R_p$  existe principalmente devido à corrente de fuga da junção *pn* e depende do método de fabricação das células fotovoltaicas.

Porém esse modelo apresenta algumas divergências quando comparado às curvas características fornecidas pelos fabricantes. Além disso, a temperatura não é levada em conta nesse modelo, portanto sua curva não considera a variação de temperatura, deixando-a menos fidedigna.

Mas existe um modelo proposto em [12] e [13] baseado em equações para o painel fotovoltaico. Através dessas equações é possível simular o painel.

A equação da corrente no painel solar é dada por

$$I = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

e a variável  $I_{pv}$  é obtida por

$$I_{pv} = (I_{pv_n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{ref}} \quad (2)$$

onde  $I_{pv_n}$  é a corrente em condições nominais, calculada por (2);  $\Delta T = T - T_n$  ( $T$  é a temperatura no painel solar e  $T_n$  é a temperatura nominal do painel solar);  $G$  e  $G_{ref}$  são os valores de radiação incidente e a radiação de referência ( $W/m^2$ ), respectivamente.  $K_i$  é o coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito (A/K).

$$I_{pv_n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc_n} \quad (3)$$

a corrente de fuga reversa no diodo,  $I_0$  é

$$I_0 = \frac{I_{sc_n} + K_i \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{oc_n} + K_v \Delta T}{a V_t}\right)} - 1} \quad (4)$$

$I_{sc_n}$  é a corrente nominal de curto circuito,  $V_{oc_n}$  é a tensão de circuito aberto nominal e  $K_v$  é o coeficiente de temperatura para esta tensão (V/K). A variável  $a$  é a constante de idealidade do diodo, contida no intervalo  $1 \leq a \leq 1.5$ .  $I_0$  é extremamente dependente da temperatura e a equação (4) é uma alternativa para expressar essa dependência mostrando uma variação linear de na tensão de circuito aberto devido a  $K_v$ . Esta equação também simplifica o modelo cancelando os erros em torno dos pontos de tensão de circuito aberto e consequentemente em torno de outros pontos da curva IxV.

Finalmente,  $V_t$  é calculado por

$$V_t = \frac{kT}{e} \quad (5)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura do painel (K) e  $e$  é a carga do elétron.

Em [14] e [15] é proposto um algoritmo para ajustar  $R_s$  e  $R_p$ . O método é baseado no fato de que existe apenas um par  $\{R_s, R_p\}$  em que a máxima potência calculada pelo modelo I-V,  $P_{max_m}$ , é igual à máxima potência experimental fornecida pelo *datasheet*,  $P_{max_e}$ . Usando  $P_{max_m} = P_{max_e}$  na equação (1), obtém-se [14]:

$$R_p = \frac{V_{mp}(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{V_{mp}I_{pv} - V_{mp}I_0 \left[ e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{aV_t}\right)} - 1 \right] - P_{max_e}} \quad (6)$$

O processo iterativo é mostrado na Figura. Os valores iniciais de  $R_s$  e  $R_p$  são [14]:

$$\begin{cases} R_{smin} = 0 \\ R_{pmin} = \frac{V_{mp}}{I_{scn} - I_{mp}} - \frac{V_{ocn} - V_{mp}}{I_{mp}} \end{cases} \quad (7)$$

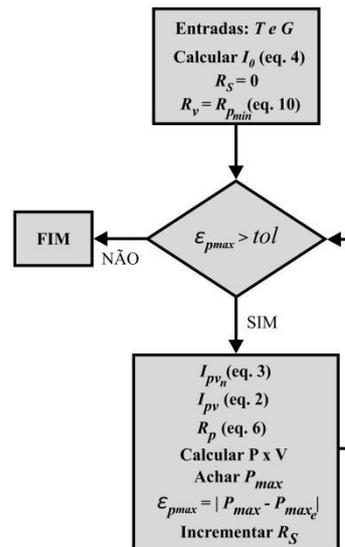


Figura 6 – Algoritmo do método para ajustar a curva I x V [14].

Os fabricantes de painéis fotovoltaicos não fornecem os parâmetros da equação da curva IxV característica, como a curva da Figura 7. Em vez disso, geralmente são fornecidas

curvas e tabelas com dados experimentais sobre as características térmicas e elétricas do dispositivo.

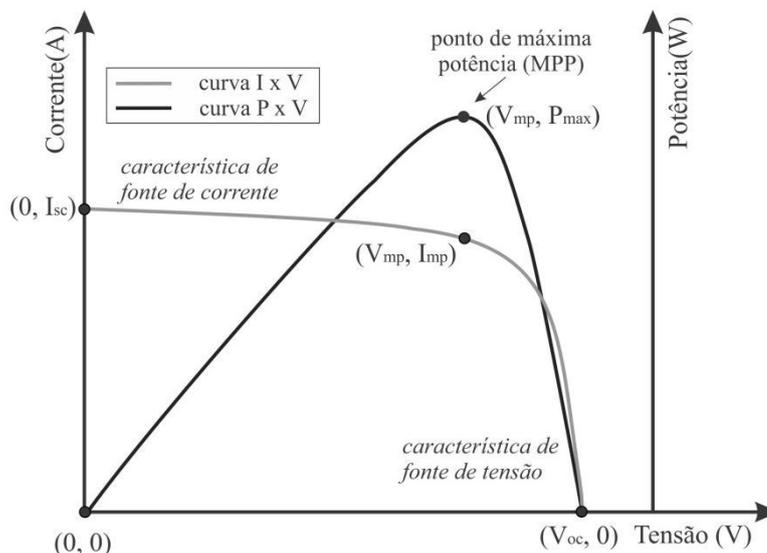


Figura 7 – Curvas características de um PV

Os dispositivos fotovoltaicos apresentam um comportamento híbrido de fonte de corrente e de fonte de tensão. A parte plana da curva da Figura 7 representa a região de operação como fonte de corrente e a partir do joelho da curva, opera como fonte de tensão. O dispositivo fotovoltaico prático possui uma resistência série  $R_s$  que tem influência na operação do dispositivo como fonte de tensão e uma resistência paralela  $R_p$  que influi na operação como fonte de corrente [12].

Outros pontos na Figura 7 são notáveis. É possível obter a corrente máxima que um painel pode fornecer, que é a corrente de curto circuito  $I_{sc}$ , que ocorre quando a tensão no painel é zero, ou seja, quando ele está em curto circuito. Também se observa a maior tensão do painel, a tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ , onde a corrente é zero.

## 2.2 Algoritmos Seguidores de Máxima Potência

Apesar de suas características favoráveis, a geração de energia solar é sazonal e fortemente dependente das condições climáticas (radiação solar, temperatura, velocidade do vento, etc.). Assim, é necessário extrair o máximo da potência possível do painel solar. Para um dado valor de radiação e temperatura existe um ponto onde a máxima potência é obtida. Por essa razão, em sistemas fotovoltaicos existe um seguidor de máxima potência, que controlam a tensão do painel no ponto de máxima potência [16].

Muitos trabalhos propuseram diferentes algoritmos de máxima potência (MPPT) Este trabalho estuda três estratégias: Perturba e Observa (P&O) [17], dP-P&O [18] e P&O Modificado (MP&O) [19].

## 2.3 Conversor Buck

O conversor DC para DC, ou *chopper*, é usado para obter uma tensão DC variável a partir de uma fonte de tensão DC constante. O valor médio da tensão de saída varia quando se altera a proporção do tempo na qual a saída fica ligada à entrada. Essa conversão pode ser obtida pela combinação de um indutor e/ou um capacitor e um dispositivo de estado sólido que opere no modo de chaveamento em alta frequência [20].

O conversor *buck*, também chamado de *Step-Down* ou abaixador de tensão, apresenta na saída a tensão menor que a de entrada. Muito utilizado em fontes de potência DC regulada e controle de velocidade de motores DC [11], [20]. Na Figura 8, é apresentada uma topologia típica de um *buck*.

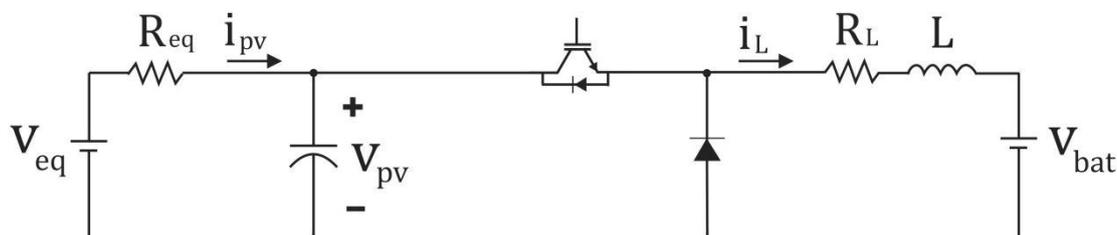


Figura 8 – Topologia básica de um conversor *buck*.

Existem dois modos de condução para um conversor. Se a corrente pelo indutor não vai a zero durante a condução do diodo, diz-se que o circuito opera no modo contínuo. Caso contrário tem-se o modo descontínuo.

### 2.3.1 Modo de Condução Contínuo (MCC)

A obtenção da relação entrada/saída pode ser feita a partir do comportamento do elemento que transfere energia da entrada para a saída. Sabe-se que a tensão média sobre uma indutância ideal, em regime, é nula, como mostrado na Figura 9 [20].

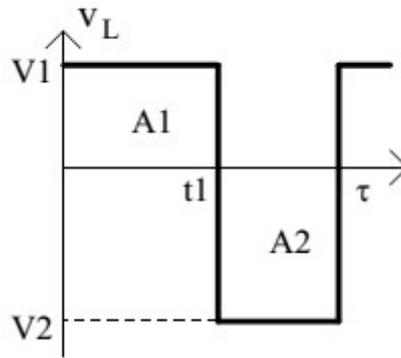


Figura 9 – Tensão sobre uma indutância em regime [20].

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 \\ V_1 \cdot t_1 &= V_2 \cdot (\tau - t_1) \end{aligned} \quad (8)$$

No caso do conversor abaixador, quando T conduz,  $v_L = E - V_o$ , e quando D conduz,  $v_L = -V_o$

$$\begin{aligned} (E - V_o) \cdot t_T &= V_o \cdot (\tau - t_T) \\ \frac{V_o}{E} &= \frac{t_T}{\tau} = \delta \end{aligned} \quad (9)$$

Essa relação entre entrada e saída, o  $\delta$  na Equação (9) é conhecido como ciclo de trabalho (*duty-cycle*) do conversor, que representa a porcentagem do período em que a chave conduz. O controle da chave é feito por um modulador de pulso (PWM), que consiste numa onda quadrada que fica em estado alto no tempo correspondente a  $\delta$ .

### 2.3.2 Modo de Condução Descontínuo (MDC)

A corrente do indutor será descontínua quando seu valor médio for inferior à metade de seu valor de pico. A condição limite é dada por [20]:

$$I_o = \frac{\Delta i_o}{2} = \frac{(E - V_o)t_T}{2 \cdot L} = \frac{(E - V_o) \cdot \delta \cdot \tau}{2 \cdot L} \quad (10)$$

Com a corrente sendo nula durante o intervalo  $t_x$ , tem-se:

$$\begin{aligned} (E - V_o)t_T &= V_o \cdot (\tau - t_T - t_x) \\ \frac{V_o}{E} &= \frac{\delta}{1 - \frac{t_x}{\tau}} \end{aligned} \quad (11)$$

Escrevendo em termos de variáveis conhecidas, tem-se:

$$I_i = \frac{i_{o_{max}} \cdot \delta}{2} \quad (12)$$

$$i_{o_{max}} = \frac{(V - V_o)}{L} \quad (13)$$

Considerando que a potência de entrada é igual à de saída, tem-se:

$$\frac{V_o}{E} = \frac{I_i}{I_o} = \frac{i_{o_{max}} \cdot \delta}{2 \cdot I_o} = \frac{(E - V_o) \cdot \delta^2 \cdot \tau}{2 \cdot I_o \cdot L} \quad (14)$$

$$\frac{V_o}{V} = \frac{V \cdot \delta^2 \cdot \tau}{2 \cdot I_o \cdot L + V \cdot \delta^2 \cdot \tau} \quad (15)$$

Todas essas equações são importantes para modelar o conversor de acordo com as exigências da aplicação.

### 2.3.3 Modelagem do Conversor Buck

A saída do conversor é uma fonte de tensão constante  $V_o$ , que representa uma bateria. O conversor CC-CC funciona como interface entre o dispositivo fotovoltaico e a tensão  $V_o$ . O bloco de MPPT faz o rastreamento da máxima potência do dispositivo fotovoltaico e fornece a referência de tensão para o controlador, que por sua vez deve regular a tensão desejada nos terminais do dispositivo [12]. Todo esse sistema está representado na Figura 10.

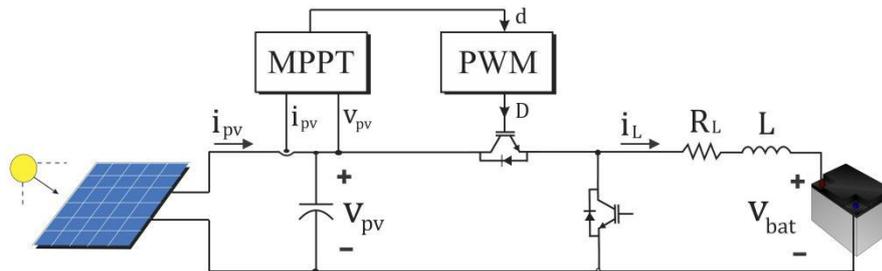


Figura 10 – Sistema carregador de baterias.

Em aplicações fotovoltaicas, o controle de tensão é preferível devido ao fato de que a tensão de máxima potência é aproximadamente constante mesmo com uma grande variação da radiação solar. O capacitor na entrada do conversor diminui o *ripple* de tensão e filtra a descontinuidade na corrente de entrada [11], [12].

Para a modelagem do conversor *buck*, o painel é linearizado em torno do ponto de máxima potência, sendo representado assim por uma fonte de tensão  $V_{eq}$  e uma resistência  $R_{eq}$  [21]. Em [12] e [15] é provado que a linearização é estável para um grande intervalo de variação de radiação.

Para a o dispositivo semiconductor em condução (situação idealizada como uma chave fechada), temos uma situação como mostrado na Figura 11. As equações nesse estado são:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L + \frac{1}{L}V_{PV} - \frac{1}{L}V_{bat} \\ \frac{dV_{PV}}{dt} = -\frac{1}{C}i_L - \frac{1}{R_{eq} \cdot C}V_{PV} + \frac{1}{R_{eq} \cdot C}V_{eq} \end{cases} \quad (16)$$



Figura 11 - Circuito equivalente para o dispositivo semiconductor em saturação.

Uma forma conveniente de escrever essas equações é na forma matricial. Esta notação facilita a linearização do modelo e define grandezas muito comuns na modelagem de sistemas em geral.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{PV}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{R_{eq} \cdot C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{R_{eq} \cdot C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bat} \\ V_{eq} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Assim, quando for realizada a linearização do sistema, tem-se:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{C \cdot R_{eq}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C \cdot R_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para o caso do dispositivo semiconductor em corte, o circuito equivalente será representado como indicado na Figura 12. A queda de tensão no diodo foi desprezada. Nesse caso, as equações que descrevem o sistema são:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1}{L}V_{bat} \\ \frac{dV_{PV}}{dt} = -\frac{1}{R_{eq} \cdot C}V_{PV} + \frac{1}{R_{eq} \cdot C}V_{eq} \end{cases} \quad (20)$$

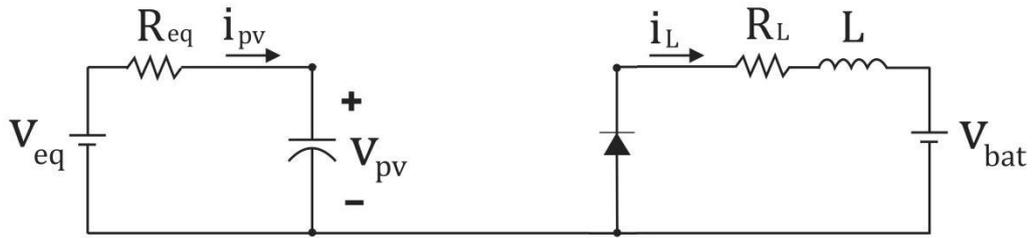


Figura 12 - Circuito equivalente para o dispositivo semiconductor em corte.

Que na forma matricial pode ser escrito como:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C \cdot R_{eq}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C \cdot R_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Observa-se que (16) e (20) podem ser escritas como:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (23)$$

$$\text{Onde } \dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{PV}}{dt} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_{PV} \end{bmatrix} \text{ e } U = \begin{bmatrix} V_{bat} \\ V_{eq} \end{bmatrix}.$$

Como se pôde verificar anteriormente, para cada situação em que chave se encontra as matrizes A e B mudam de valor. Deste modo, torna-se interessante obter uma única equação para descrever o comportamento de um conversor e assim facilitar sua análise.

As equações de espaço de estado do sistema podem então ser escritas como:

$$\langle \dot{X} \rangle = (A_0 + d \cdot (A_1 - A_0)) \cdot \langle X \rangle + (B_0 + d \cdot (B_1 - B_0)) \cdot \langle U \rangle \quad (24)$$

$\langle * \rangle$  representa o valor médio da variável \*.  $d$  representa o valor médio do ciclo de trabalho do conversor.

A Equação (24) é não linear, pois envolve multiplicação de termos variantes no tempo. Assim, torna-se necessário linearizar o modelo. Em, um método de análise de pequenos sinais é proposto em [11]. O primeiro passo desse método é gerar um pequeno distúrbio em regime permanente e verificar o que ocorre no sistema. Assim:

$$\begin{cases} d = D + \hat{d} \\ \langle X \rangle = x + \hat{x} \\ \langle U \rangle = u + \hat{u} \end{cases} \quad (25)$$

Substituindo (25) em (24), e realizando algumas manipulações algébricas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_{pv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{eq} \\ \hat{V}_{bat} \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (26)$$

A função transferência que relaciona a tensão de entrada com o *duty cycle* é então:

$$F_{23}(s) = G_{vd}(s) = \left. \frac{\hat{v}_{pv}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{V}_{eq}, \hat{V}_{bat}=0} \quad (27)$$

## 2.4 Baterias

Uma bateria pode ser considerada como uma central que produz energia elétrica a partir de energia química através de reações de óxido-redução, chamadas também de eletrólise. Para entender o efeito da eletrólise, identificam-se dois tipos de materiais ativos com propriedades diferentes. O primeiro, chamado de catodo ou terminal positivo, não deve conter muitos elétrons, enquanto o segundo, em contrapartida, denominado anodo ou terminal negativo, é rico em elétrons. Quando uma carga é conectada a uma bateria, externamente existe um fluxo de elétrons através da carga, o que ocorre devido à tensão existente entre os terminais [11].

Existem diversos tipos de baterias utilizando tecnologias e materiais diferentes que resultam em equipamentos de tamanhos, pesos, capacidades de armazenamento, custos e durabilidades bastante diferentes. Além disso, existem baterias especificamente projetadas

para sistemas fotovoltaicos que levam em conta as características próprias desse tipo de aplicação [11].

A capacidade das baterias determina o tempo que a bateria pode fornecer energia para os equipamentos consumidores. A forma mais comum é expressá-la em Ah (Ampère-hora). Essa unidade de energia quantifica a corrente elétrica que se pode tirar em determinado tempo da bateria. Normalmente, quando a bateria não consegue mais armazenar 80% da energia inicial, a vida útil termina, significando que seja preciso substituir a bateria. Como os custos das baterias são relativamente altos, é importante que as baterias tenham vida longa, de preferência acima de 3 ou 4 anos [11].

## **2.5 Microcontroladores**

Pode-se definir o microcontrolador como um componente eletrônico, dotado de uma inteligência programável, utilizado no controle de processos lógicos. Esses processos se baseiam nas ações lógicas que devem ser executadas, dependendo do estado dos periféricos de entrada e/ou saída [11].

O microcontrolador é programável, pois toda lógica de operação é estruturada na forma de um programa e gravada dentro do componente. Depois disso, toda vez que o microcontrolador for alimentado, o programa interno será executado [11].

### 3 Metodologia

#### 3.1 Componentes do Sistema

O primeiro passo na construção do conversor foi realizar a modelagem do conversor para então simulá-lo e em seguida fazer a montagem para realização dos testes. O conversor *buck* foi escolhido devido as características do painel disponível e da bateria. O painel utilizado apresenta os dados da Tabela 1. O ponto de máxima potência desse painel é de 18,6V, e a bateria utilizada é uma de capacidade 60 Ah e tensão 12 V. Logo seria necessário um conversor abaixador para utilizar como carregador de baterias.

Tabela 1 – Parâmetros dos painel Kyocera SM48KSM utilizado nas simulações e experimentos.

Parâmetro	Valor
Resistência série - $R_{sm}$	0,155 $\Omega$
Resistência paralelo- $R_{pm}$	155,03 $\Omega$
Número de células	36
Potência máxima	48 W
Tensão de máxima potência	18.6 V
Corrente de máxima potência	2.59 A
Tensão de circuito aberto- $V_{oc}$	22.1 V
Corrente de curto-circuito- $I_{sc}$	2.89 A
Coefficiente de temperatura de $V_{oc}$	-0.07 V/K
Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$	0.00166 A/K
Temperatura do ambiente	25 °C
Temperatura do painel	47 °C
Fator de idealidade do diodo	1,05

Em seguida, definiu-se os parâmetros do conversor. Conhecendo as características do painel e da bateria, o primeiro passo para dimensionar os componentes foi analisar a situação mais crítica encontrada pelo sistema painel-bateria. Essa situação ocorre quando há maior insolação no painel e a bateria está completamente descarregada [21].

Os dados da bateria estão na Tabela 2. A frequência de operação do conversor escolhido foi de 12 kHz e a variação de corrente de 20% para a potência nominal, por questões de projeto.

Tabela 2 – Parâmetros da bateria utilizada nas simulações e experimentos.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	12 V
Capacidade nominal	60 Ah
Estágio inicial de carga	20 %
Capacidade máxima	70 Ah
Tensão completamente carregada	14.14 V
Tensão completamente descarregada	8.00 V
Corrente nominal de descarga	6.25 A
Resistência interna	0.018 Ω

Com os dados calculou-se inicialmente o indutor do conversor. Considerando a situação extrema da bateria completamente descarregada e a tensão de máxima potência do painel que é de 18,6 V, é possível calcular o ciclo de trabalho de acordo com (11).

$$d = \frac{8}{18,6} \therefore d = 0,430 \quad (28)$$

Considerando o dispositivo semiconductor em saturação, o circuito do conversor *buck* fica como indicado na Figura 12. Assim, a tensão no indutor é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt} \rightarrow L = \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad (29)$$

Considerando que o desejado seja  $\Delta i = 0,2 \cdot I_L$  e

$$V = V_i - V_o \quad (30)$$

$$\Delta t = d \frac{1}{f} \quad (31)$$

Substituindo-se (30) e (31) em (29) tem-se a indutância

$$L = \frac{(18,6 - 8) \cdot 0,430 \cdot \left(\frac{1}{12000}\right)}{0,2 \cdot 2,89} = 0,657 \text{ mH} \quad (32)$$

Considerou-se  $I_L$  como 2,89, pois esse é o valor da corrente de curto-circuito do painel, portanto o maior valor que o painel fornece ao conversor. O indutor escolhido para o conversor foi de 1 mH com resistência de 1 Ω, valor disponível no laboratório. Este indutor com maior indutância não compromete o funcionamento do conversor já que qualquer valor maior do que o encontrado garante uma operação no modo de condução contínua.

O capacitor de entrada do conversor é obtido considerando que ele é responsável pela metade da corrente que irá passar pela chave semicondutora, ou seja, 1,5 A (na potência máxima o painel deve entregar 3 A ao circuito) [21]. A corrente no capacitor é dada por

$$i = C \frac{dv}{dt} \rightarrow i = C \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (33)$$

Substituindo (31) em (33),

$$C = \frac{i \cdot d}{f \cdot \Delta v} \quad (34)$$

Sabe-se que  $i$  é 1,5 A. Adotando que o ciclo de trabalho máximo ocorrerá quando a tensão no painel estiver em 18,6 V ao mesmo tempo em que a bateria estiver completamente carregada, seu valor será de aproximadamente 0,75. Considera-se também admissível variação de tensão na entrada do painel de 1 V. Então

$$C = \frac{1,5 \cdot 0,75}{12000 \cdot 1} = 93,75 \mu F \quad (35)$$

Para o capacitor de entrada, escolheu-se um capacitor de 100  $\mu F$ , disponível no laboratório. Os parâmetros do conversor estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros dimensionados do conversor *buck*

Parâmetro	Valor
Indutor – $L$	1.0 $mH$
Capacitor no painel – $C_p$	100 $\mu F$
Tensão de saída – $V_{bat}$	12 $V$
Frequência de chaveamento – $f_s$	12 $kHz$
Resistência do indutor – $R_L$	1 $\Omega$

### 3.2 Seguidor de Máxima Potência

Um dos algoritmos de MPPT usado mais frequentemente é o Perturba e Observa (P&O), devido a sua baixa complexidade e ao fato de requerer pouco processamento. No entanto, se a mudança na intensidade de radiação causa uma mudança na potência maior do que aquela causada pelo algoritmo de MPPT, este algoritmo pode interpretar mal a mudança considerando-a um efeito de sua própria ação [16].

Desta forma, variações P&O são propostas na literatura para solucionar o problema da mudança brusca na radiação incidente. Estes algoritmos estão detalhados nas seções a seguir.

### 3.2.1 Perturba e Observa (P&O)

O algoritmo Perturba e Observa (P&O) é apresentado em [22]. Esse método tem sido amplamente usado devido a sua baixa complexidade e originou muitos outros algoritmos como *Modified P&O*, *Hill Climbing* e *Modified Hill Climbing* [23].

P&O incrementa ou decrementa periodicamente a tensão do arranjo fotovoltaico e compara a potência de saída com o valor anterior da mesma. Se a potência entregue aumentou, a perturbação continua na mesma direção no próximo ciclo, caso contrário a perturbação muda. Isto significa que existe uma perturbação na tensão nos terminais do arranjo todo ciclo de execução do algoritmo. Quando o ponto de máxima potência é atingido, o algoritmo P&O oscila ao redor deste ponto. Figura 13 mostra o fluxograma do algoritmo P&O.

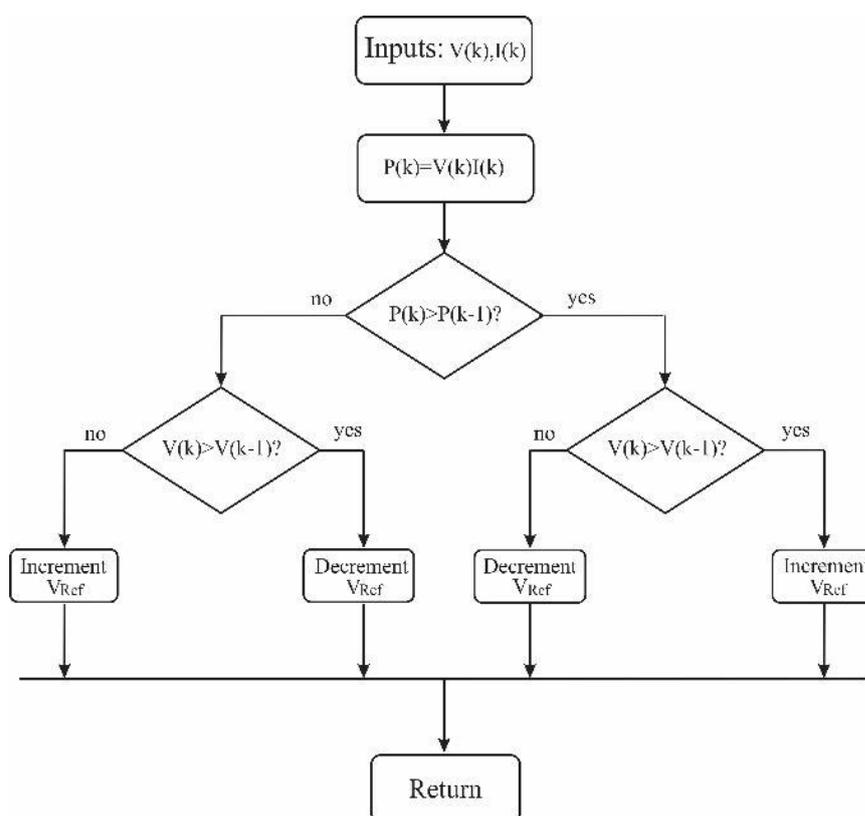


Figura 13 – Fluxograma do algoritmo P&O

### 3.2.2 dP - Perturba e Observa (dP-P&O)

O algoritmo dP-P&O é uma modificação do clássico P&O no sentido de que ele pode prevenir-se de seguir na direção errada durante uma mudança brusca de radiação. Este método

realiza uma medição extra na metade do período de amostragem do MPPT sem causar nenhum tipo de perturbação, como pode ser visto na Figura 14 [24].

Considerando que a taxa de variação de potência é constante durante um período de amostragem, o que é uma boa aproximação na maioria dos casos, a mudança de potência entre  $P_x$  e  $P_{k+1}$  reflete apenas a mudança devida às causas ambientais, já que nenhuma ação foi feita por parte do algoritmo [24].

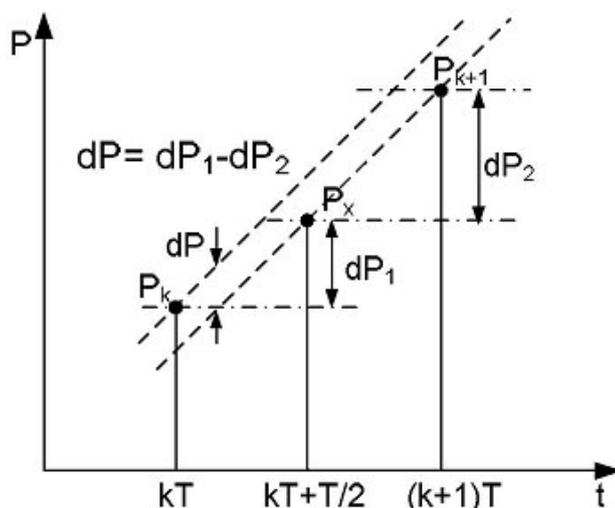


Figura 14 – Medida da potência entre dois períodos de amostragem [24].

### 3.2.3 Perturba e Observa Modificado (MP&O)

O P&O modificado (MP&O) desacopla as flutuações de potência causadas pelo processo de *hill-climbing* daqueles causados pela variação na radiação [18].

Esse método adiciona um processo para estimar a mudança de radiação solar durante a perturbação para medir a quantidade de energia foi modificada pelas condições climáticas e, então, compensa-las na próxima perturbação. A Figura 15 mostra o fluxograma do P&O modificado [18].

Existem dois modos de operação: Modo 1 para o processo de estimação e Modo 2 para o processo de perturbação. Modo 1 mede a variação de energia devido a mudança na tensão e as condições climáticas e mantém a tensão no painel constante para o próximo período. Modo 2 mede a mudança na potência e determina a nova tensão no painel baseando-se nas variações de energia no período da medição e no anterior [18].

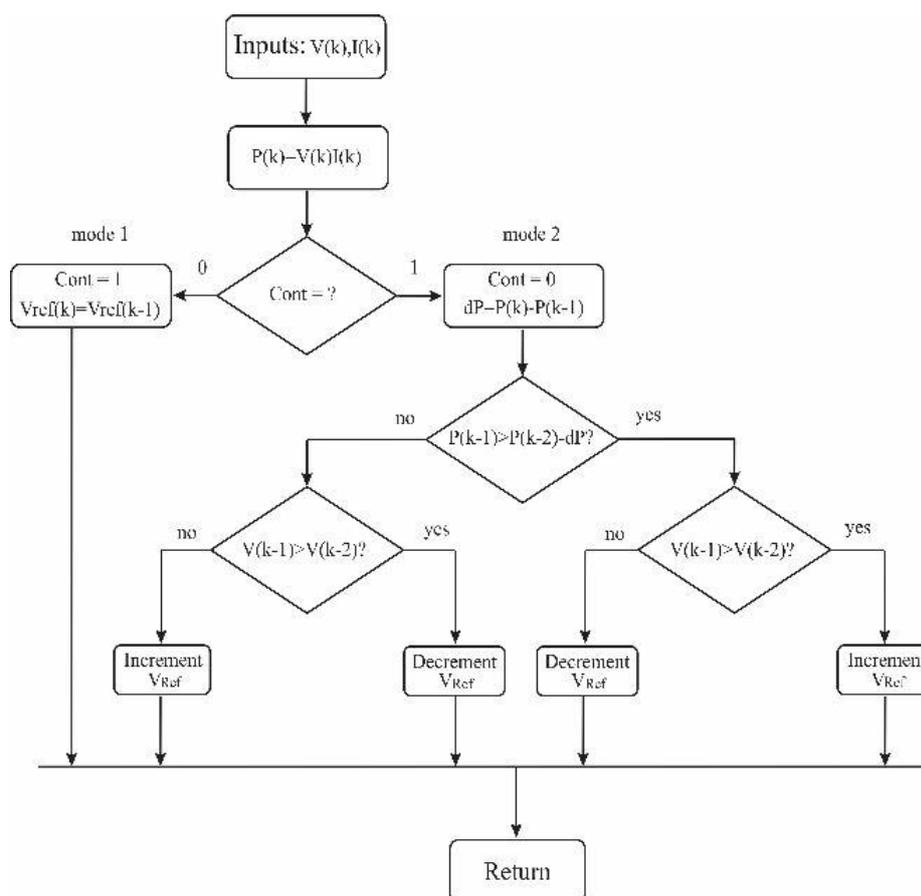


Figura 15 – Fluxograma do algoritmo MP&amp;O.

### 3.3 Eficiência Dinâmica e Eficiência Instantânea

Medir a eficiência dos algoritmos no decorrer da simulação fornece muito mais informações sobre o desempenho do MPPT do que medir a eficiência total. Assim, as eficiências instantânea e dinâmica são ferramentas importantes para comparar os comportamentos dos MPPT. Em locais onde geralmente haja céus nublados, o comportamento dinâmico do seguidor de máxima potência deve ser considerado. Inversores que tenham um seguidor rápido, por exemplo, tem de certa forma uma maior produção de energia sob mudanças rápidas de radiação do que dispositivos que possuam um MPPT devagar [25].

Desta forma, a eficiência dinâmica do MPPT,  $\eta_{MPPT_{dyn}}$  pode ser definida como

$$\eta_{MPPT_{dyn}}[\%] = 100 \int_0^{T_{mm}} \frac{P_{PV_{meas}}}{P_{PV_{ideal}}} \quad (36)$$

onde  $P_{PV\_meas}$  é a potência de saída medida no painel e  $P_{PV\_ideal}$  é a máxima potência disponível no painel [25].

A eficiência instantânea é:

$$\eta_{MPPTins}[\%] = 100 \frac{P_{PV\_meas}}{P_{PV\_ideal}}. \quad (37)$$

### 3.4 Aquisição de Dados

Para a implementação do algoritmo de máxima potência utilizou-se um microcontrolador PIC 18f4550, onde um programa para o cálculo do ciclo de trabalho do conversor foi desenvolvido.

O fluxograma mostra que para o funcionamento do algoritmo é necessário medir os valores de tensão e corrente na entrada do painel para calcular o ciclo de trabalho. Um sensor de tensão foi projetado, como indicado na Figura 16. A maior tensão lida no painel é a tensão de circuito aberto, que no painel utilizado é de 22,1 V, e o valor máximo que o PIC aceita em sua porta analógica é 5 V. Por isso, utilizou-se um divisor de tensão ligado a um seguidor de tensão buffer, utilizado para diminuir as perdas no sinal. Um diodo zener de tensão reversa 5,1 V é utilizado pra proteção da porta analógica do PIC, para evitar sobre tensão na mesma.

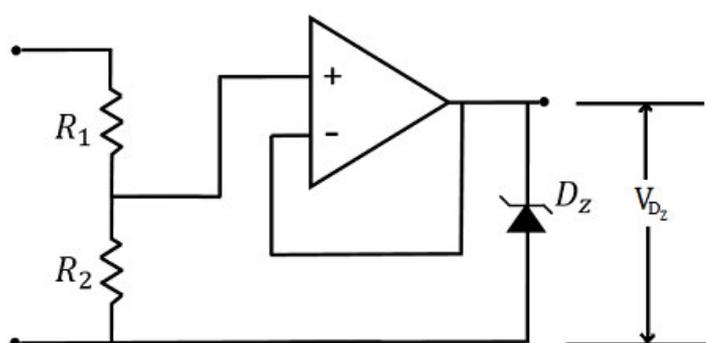


Figura 16 – Sensor de tensão projetado [11].

Os valores escolhidos para as resistências foram  $R_1 = 820 \text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ , então o sensor mede até 46 V, bem acima do valor máximo do painel. A equação que relaciona a tensão no painel com a tensão que chega à porta analógica é dada por (35).

$$V_{painel} = 9,2 \cdot V_{Dz}. \quad (38)$$

O sensor de corrente utilizado foi o ACS712 de 5 A, que é um sensor linear baseado no efeito Hall. Ele gera um valor de tensão para um determinado valor de corrente. Para encontrar a melhor forma de relacionar a tensão de saída do sensor com a corrente do painel, realizou-se uma série de medidas para encontrar a melhor equação. Observou-se que equação de 3º grau que melhor representa é (36). Equações de ordens maiores descrevem melhor os pontos medidos pelo sensor, mas são impraticáveis para o PIC.

$$I_{\text{painel}} = -12,2817 \cdot V_{\text{sensor}}^3 + 104,9346 \cdot V_{\text{sensor}}^2 + 292,788 \cdot V_{\text{sensor}} + 267,9167. \quad (39)$$

Para garantir um bom sinal de tensão do sensor de corrente, um filtro passa baixa RC foi projetado e inserido antes da porta analógica do PIC. Projetou-se um filtro com frequência de corte em 10% do valor da frequência de chaveamento do IGBT, de 12 kHz. Assim os valores de R e C do filtro foram escolhidos analisando (37).

$$RC = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (40)$$

Como  $f_c = 1200$  Hz, os valores da resistência e capacitores escolhidos de acordo com valores comerciais foram:  $R = 4,7$  k $\Omega$  e  $C = 33$  nF.

### 3.5 Circuito de Chaveamento do Buck

Para chavear o conversor *buck* escolheu-se o circuito integrado (CI) IR2104, um driver para acionamento de MOSFET's e IGBT's, que possui a conexão como indicado na Figura 17. Embora o conversor *buck* tenha apenas um IGBT, esta configuração é a mais indicada para este circuito integrado. O *duty* de saída do canal de alta possui a mesmo *duty* do sinal de entrada do CI, enquanto o canal de baixa funciona com o *duty* barrado. Por fim, um capacitor na saída de 100  $\mu$ F foi inserido na saída do conversor, para diminuir o *ripple* de corrente na bateria [11].

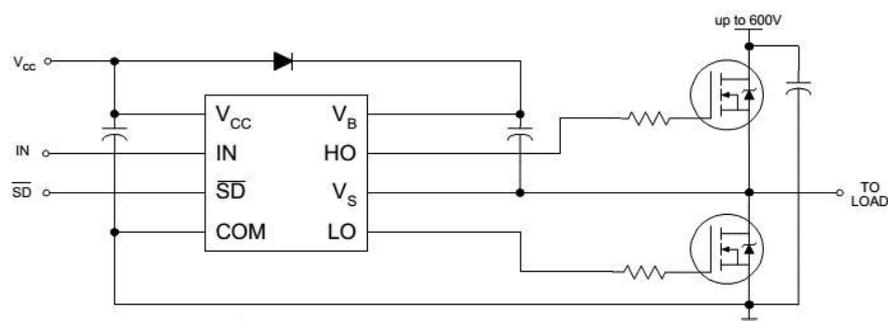


Figura 17 – Circuito de chaveamento do CI [11].

### 3.6 Sistema Carregador de Baterias

A Figura 18 contém o experimento montado com o conversor, o microcontrolador responsável pelo MPPT e o circuito de chaveamento dos dois IGBT's como um carregador de baterias. Já a Figura 19 mostra mais claramente os circuitos menores conectados ao conversor.

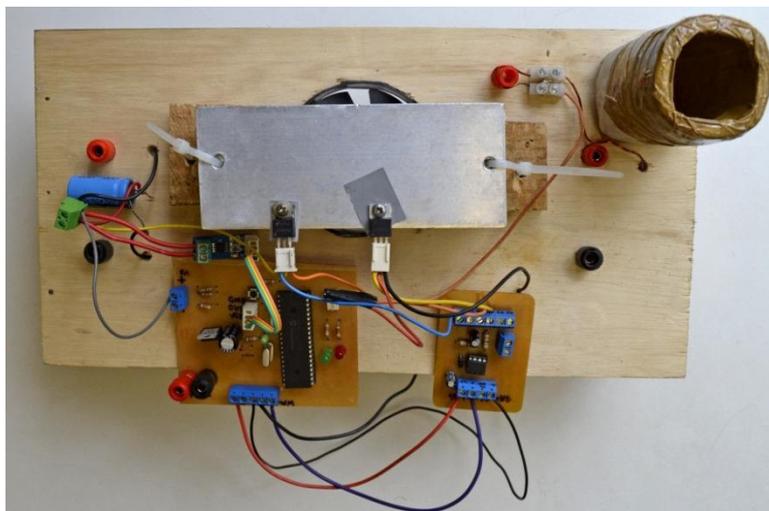


Figura 18 – Conversor *buck* com circuitos do PIC e IR2104.

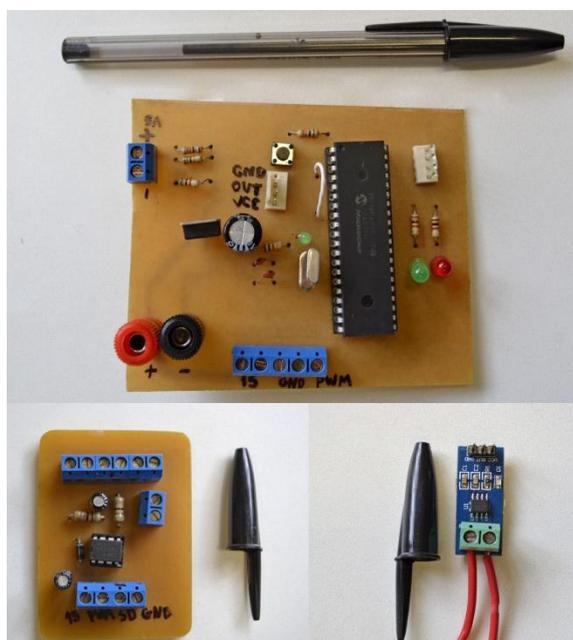


Figura 19 – No sentido horário começando do topo: circuito do PIC com controle de MPPT, sensor de corrente, IC para chaveamento dos IGBT's.

## 4 Resultados e Discussões

Os resultados seriam divididos em duas partes: a primeira contendo as simulações realizadas em ambiente Simulink/Matlab e a segunda, os resultados encontrados na prática, mas estes não foram coletados a tempo porque não houve tempo para ajuste do MPPT.

### 4.1 Simulações

A performance do carregador de baterias de 48 W baseado num conversor buck foi simulado usando o software Matlab/Simulink. Primeiramente, as performances dos algoritmos de MPPT foram comparadas durante variação da radiação solar incidente de acordo com os perfis de radiação apresentados na Figura 20, que são baseadas nos testes conduzidos em [25].

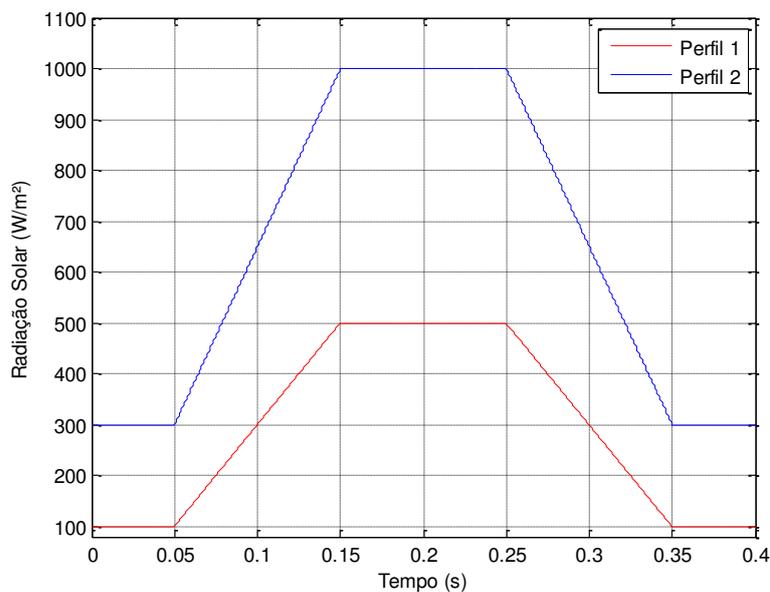


Figura 20 – Perfis de radiação para simulação.

#### 4.1.1 Resultados para a rampa de radiação de 10-50%

O primeiro resultado é a potência gerada pelo painel, Figura 21. Nesta figura, curvas para dP-P&O e MP&O estão sobrepostas na maior parte do tempo. P&O não atingiu o MPP durante a rampa e demorou, pelo menos, 0,03s a mais para alcançar o MPP em comparação com os outros algoritmos. As oscilações apresentadas pelo P&O são causadas pela limitação deste algoritmo em seguir a direção correta durante variações bruscas de radiação.

O algoritmo de P&O apresenta dificuldade em seguir a tensão de máxima potência, especialmente durante a rampa, imediatamente após 0.05s, como mostrado na Figura 22. A corrente para o P&O também tem maior *ripple* devido à dificuldade de seguir na direção correta. MP&O e dP-P&O apresentaram um comportamento similar conforme ilustrado na Figura 23.

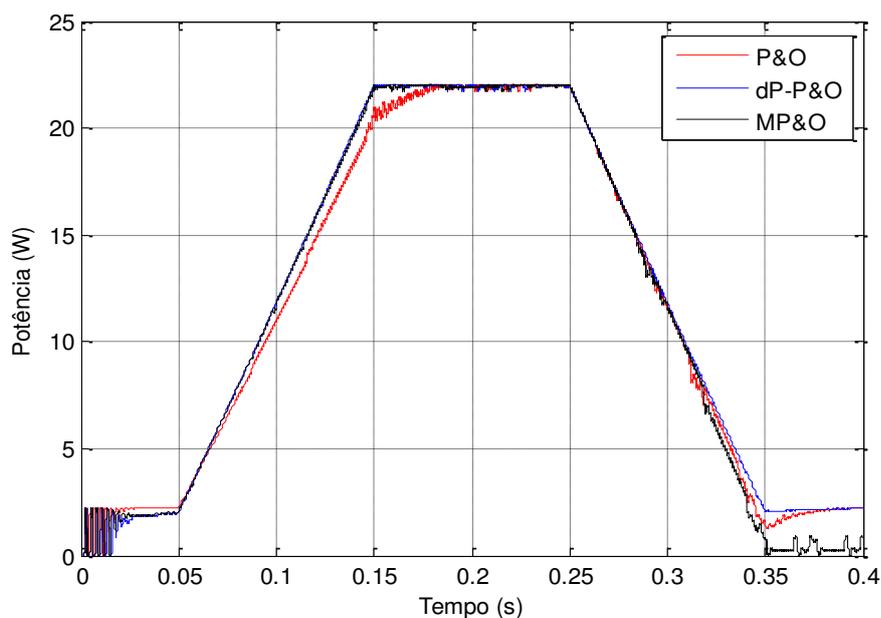


Figura 21 – Comportamento para a potência do PV para os algoritmos estudados para perfil 1 de radiação.

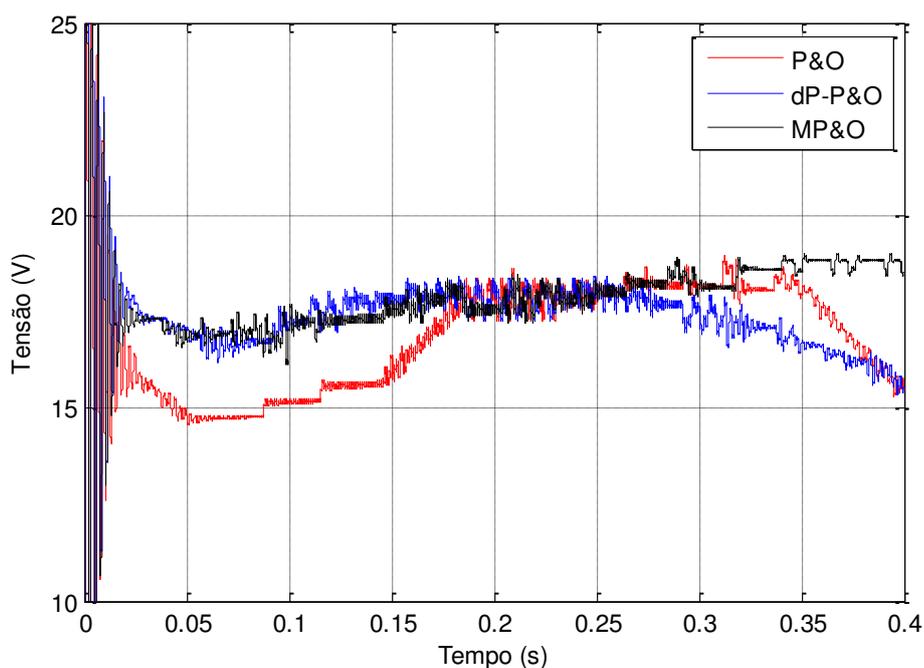


Figura 22 – Tensão no barramento do PV para o perfil 1 de radiação.

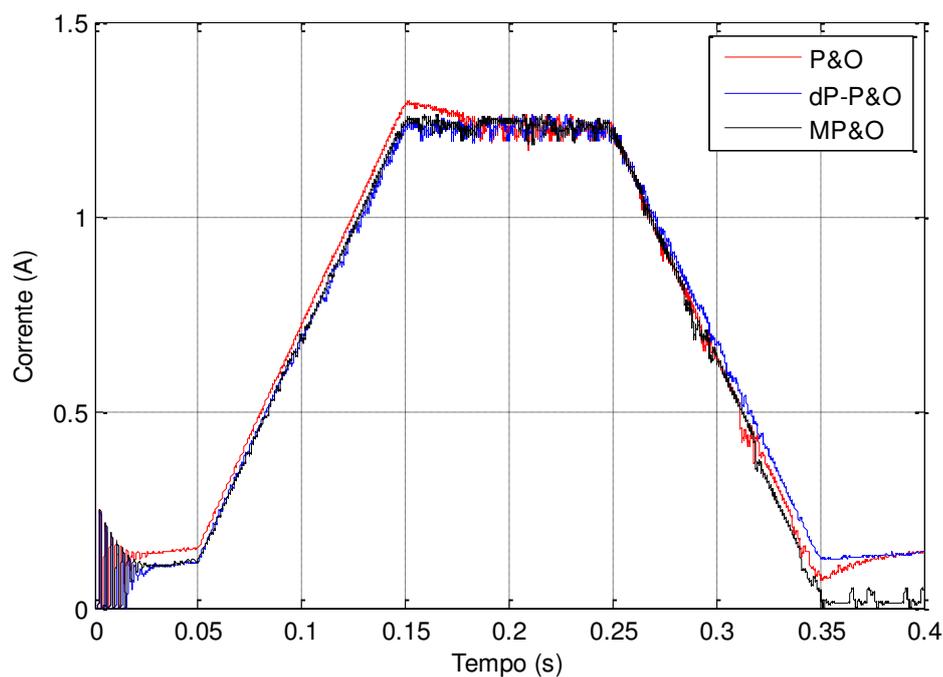


Figura 23 – Corrente do PV para perfil 1 de radiação.

#### 4.1.2 Resultados para a rampa de radiação de 30-100%

A Figura 24 mostra a potência gerada para o segundo perfil de radiação. Durante variações da radiação solar incidente mais uma vez os algoritmos MP&O e dP-P&O mostraram um comportamento muito similar, mas dessa vez até mesmo P&O seguiu melhor o formato da curva de radiação, apresentando maior *ripple* na segunda rampa quando a radiação cai para 30%.

Figura 25 mostra que a tensão de máxima potência é mais estável para os três algoritmos quando submetidos a este perfil de radiação. Figura 26 também mostra um formato coincidente para as curvas, mas P&O apresenta um maior *ripple*.

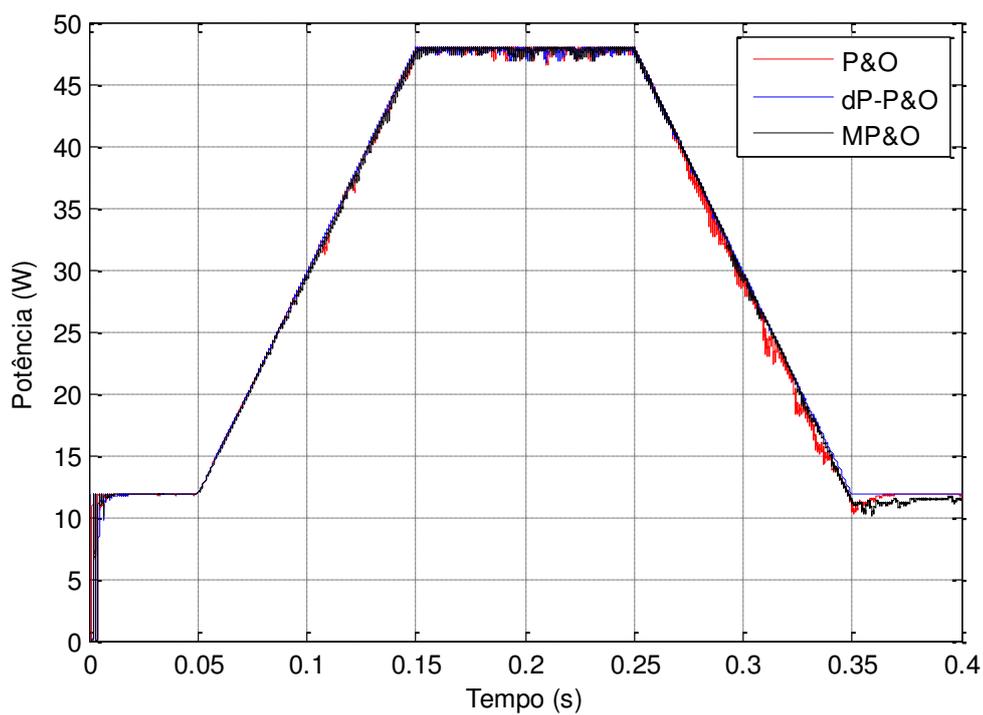


Figura 24 - Comportamento para a potência do PV para os algoritmos estudados para perfil 2 de radiação.

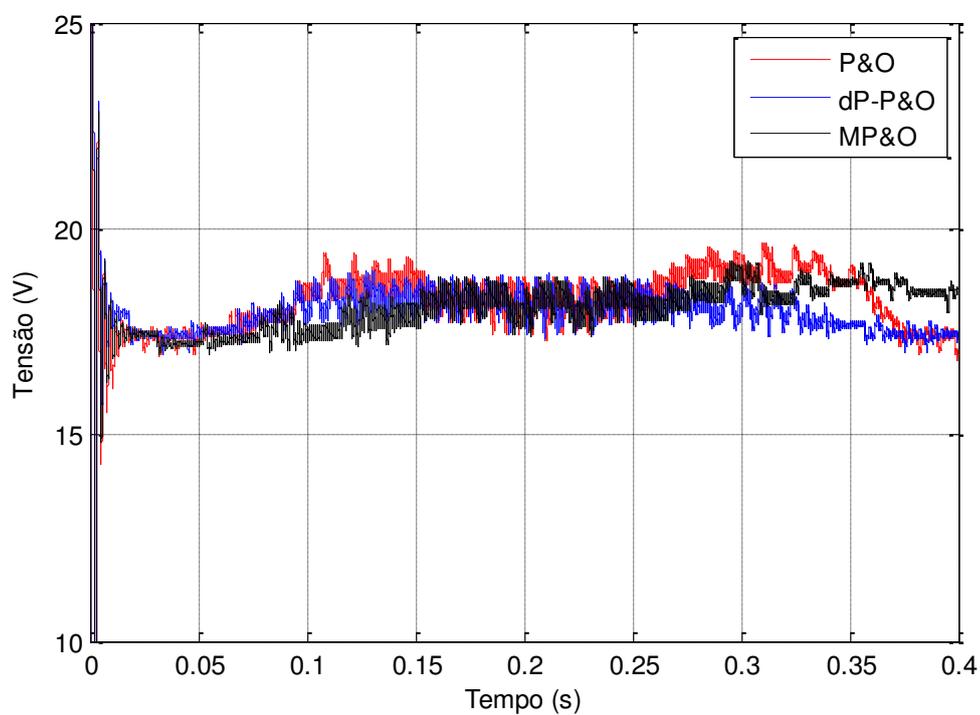


Figura 25 – Tensão no barramento do PV para o perfil 2 de radiação.

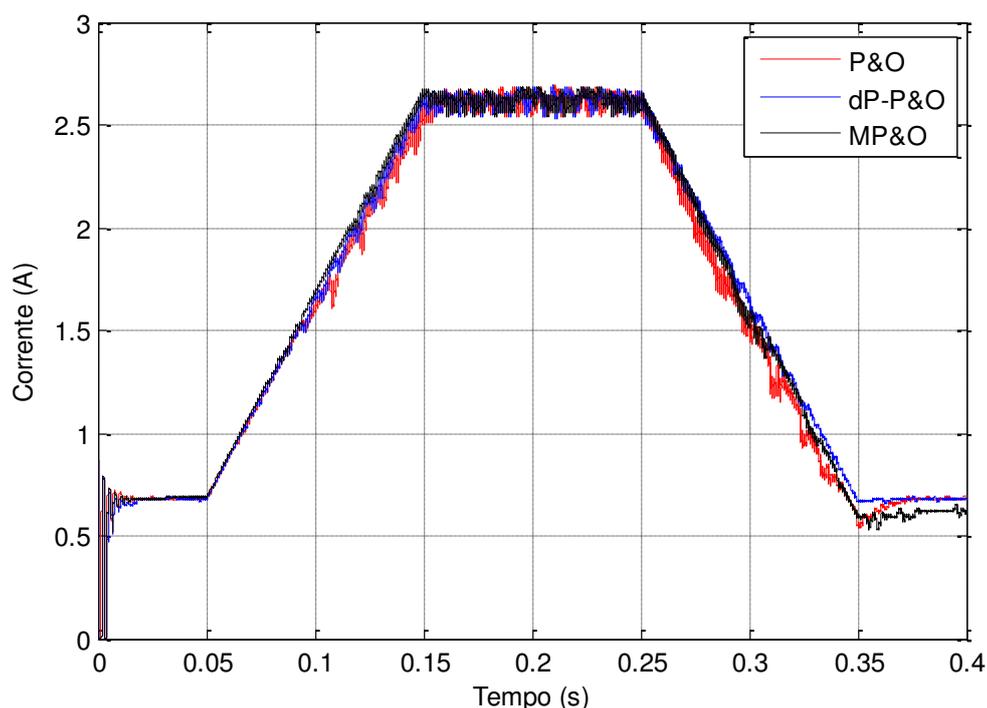


Figura 26 – Corrente do PV para perfil 2 de radiação.

#### 4.1.3 Eficiência Dinâmica e Eficiência Instantânea

A Tabela 4 indica a eficiência dinâmica para os três algoritmos estudados. Embora as performances dos três algoritmos de máxima potência sejam similares, dP-P&O apresenta uma melhor performance. A diferença entre os algoritmos cai para menos de 1% para o perfil 2 de radiação.

Tabela 4 – Eficiências dinâmicas para os dois perfis de radiação

	Eficiência para perfil 1 (%)	Eficiência para perfil 2 (%)
P&O	96.4	98.7
MP&O	96.0	98.7
dP-P&O	98.9	99.4

Analisando a Figura 27 é possível acompanhar a eficiência instantânea de cada algoritmo para o perfil 1 de radiação. Uma grande variação pode ser observada especialmente durante as rampas, sendo o dP-P&O o mais estável dentre eles. Para o perfil 2, todos os algoritmos apresentam um melhor desempenho, dP-P&O é ainda mais estável e P&O e MP&O apresentam um comportamento similar como visto na Figura 28. Tabela 4 mostra uma

informação geral sobre o desempenho dos algoritmos, mas a Figura 27 e a Figura 28 dão uma informação detalhada sobre como cada MPPT se comporta durante a simulação.

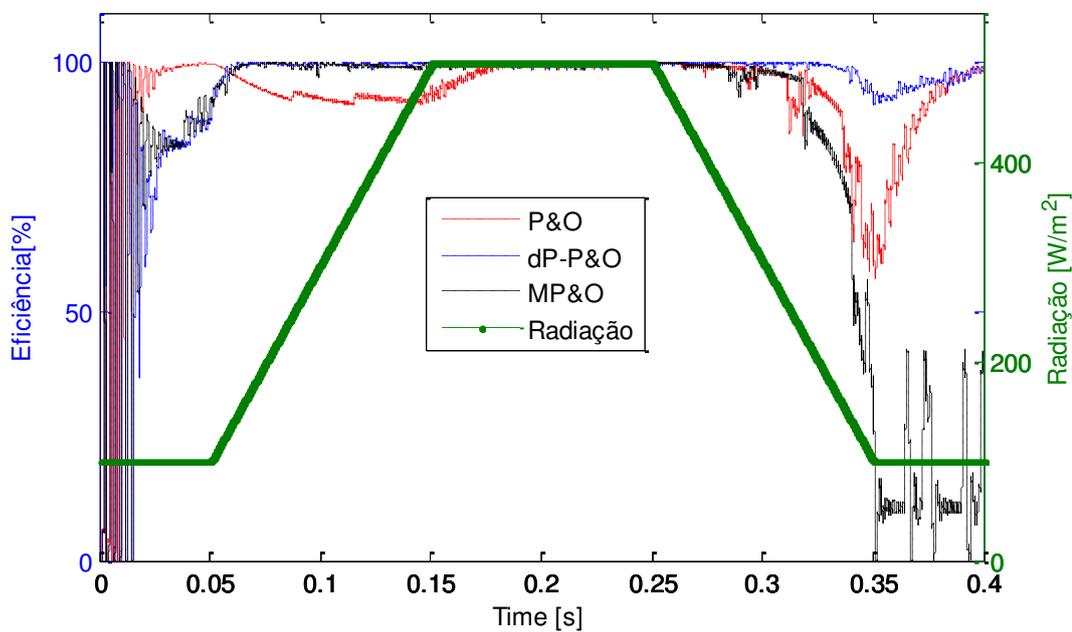


Figura 27 – Eficiência instantânea para os três algoritmos estudados e perfil 1 de radiação.

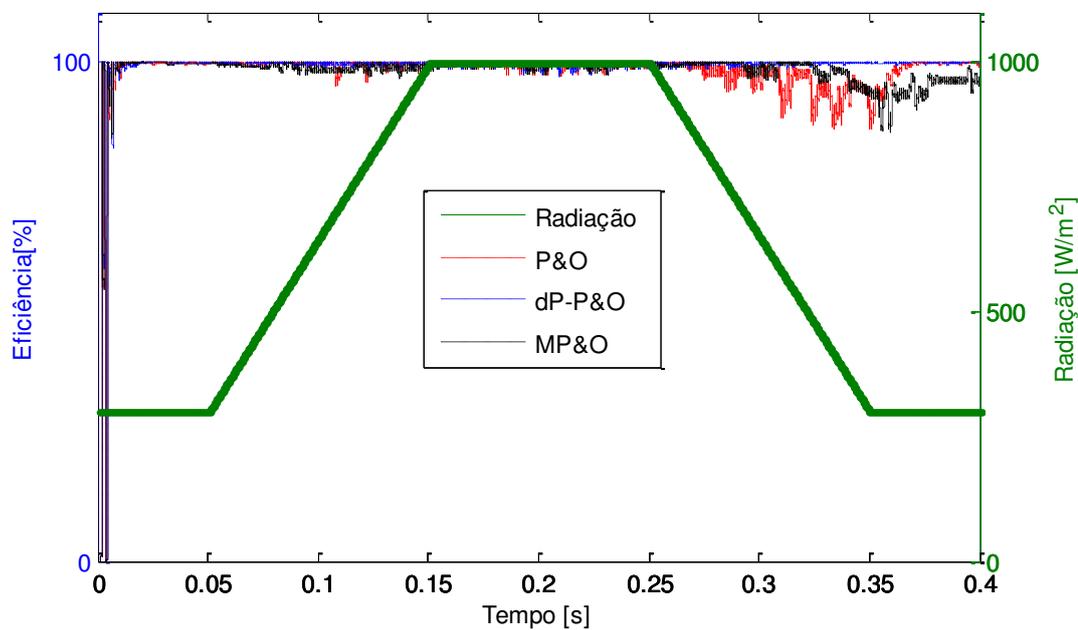


Figura 28 – Eficiência instantânea para os três algoritmos estudados e perfil 2 de radiação.

## 5 *Conclusão*

Nessa monografia foi apresentado um projeto e desenvolvimento de um carregador de baterias utilizando o controle de um conversor buck conectado a um painel solar. Sabendo da baixa eficiência desse tipo de sistema são necessários mecanismos para garantir um maior rendimento, neste contexto os algoritmos seguidores de máxima potência melhoram a eficiência do sistema fornecendo mais energia para o banco de baterias.

Simulações usando o software Matlab/Simulink realizadas neste trabalho compararam três algoritmos seguidores de máxima potência: Perturba e Observa (P&O), dP - Perturba e Observa (dP-P&O) e Perturba e Observa Modificado (MP&O). O sistema carregador de baterias foi submetido a dois perfis de variação de radiação e dP-P&O apresentou, no geral, um melhor desempenho. MP&O apresentou um comportamento bem próximo ao dP-P&O e P&O teve o pior desempenho, no entanto é o algoritmo que exige menos esforço computacional.

Como continuidade do trabalho, seria interessante finalizar o protótipo e construir um sistema de coleta de dados para que o sistema de carregamento de baterias possa ficar conectado o dia inteiro, e dessa forma, observar melhor o funcionamento do sistema em diversas situações de temperatura, radiação e sombreamento.

## 6 *Referências Bibliográficas*

1. CDIAC. **Carbon Dioxide Information Analysis Center**. Disponível em: <[http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo\\_2010.html](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo_2010.html)>. Acesso em: 02 maio 2015.
2. INSTITUTO Humanitas Unisinos. **Unisinos**, 2014. Disponível em: <<http://www.ihu.unisinos.br/noticias/534541-com-termicas-poluicao-provocada-por-energia-mais-que-dobra-no-pais>>. Acesso em: 02 maio 2015.
3. ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 2015.
4. RESOLUÇÃO Normativa. **ANEEL**, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 2015.
5. EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2014. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/Leil%C3%A3odeEnergiaDeReserva2014atraiinvestimentosdeR\\$7,1bi.aspx?CategoriaID=6942](http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/Leil%C3%A3odeEnergiaDeReserva2014atraiinvestimentosdeR$7,1bi.aspx?CategoriaID=6942)>. Acesso em: maio 2015.
6. STAKEHOLDERS INFRASTRUCTURE. **IEA PVPS, REN 21, National Energy Agencies & Internal Database**. [S.l.]. 2015.
7. IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Trends 2014 in Photovoltaic Applications**. [S.l.]: [s.n.], 2014.
8. EPIA EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. **Solar Photovoltaic Competing in the Energy Sector - On the road to competitiveness**. [S.l.]: [s.n.], 2011.
9. 3TIER. **Global Mean Solar Irradiance**, 2014. Disponível em: <[http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tier\\_solar\\_irradiance.pdf](http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tier_solar_irradiance.pdf)>. Acesso em: 2015.
10. TAVARES PINHO, J.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB, 2014.
11. OLIVEIRA, J. H. D. **Projeto e Desenvolvimento de um Carregador de Bateria Através do Controle de um Conversor Buck**. Universidade Federl de Viçosa. Viçosa. 2014.
12. VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. UNICAMP. Campinas. 2010.

13. BRITO, E. M. D. S. et al. Comparison of Solar Panel Models for Grid Integrations Studies. **INDUSCON**, Fortaleza, 2012.
14. VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 1, p. 1198-1208, Maio 2009.
15. VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. **Brazilian Journal of Power Electronics**, v. 14, n. 1, p. 35-45, 2009.
16. PETERLE CARLETTE, L. et al. Comparison of MPPT Strategies in Battery Charging Photovoltaic Systems, 2015.
17. VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Analysis and simulation of the P&O MPPT algorithm using a linearized PV array model. **Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian**, Setembro 2009. 189-195.
18. SERA, D. et al. Optimized Maximum Power Point Tracker for Fast-Changing Environmental Conditions. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, Julho 2008. 2629-2637.
19. LIU, C.; WU, B.; CHEUNG, R. Advanced Algorithm for MPPT Control of Photovoltaic Systems. **Canadian Solar Buildings Conference**, Agosto 2004.
20. POMILIO, J. A. **Fontes Chaveadas - Topologias básicas de Conversores CC-CC não-isolados**. [S.l.]: [s.n.].
21. CUPERTINO, A. F. et al. A Grid-Connected Photovoltaic System with a Maximum Power Point Tracker using Passivity-Based Control Applied in a Boost Converter, Fortaleza, novembro 2012.
22. NASCIMENTO, H. L. D. **Conversor Buck como Interface entre Paineis Solares e Banco de Baterias**. Universidade Federal do Espírito Santo. [S.l.]. 2006.
23. MIDYA, P. et al. **Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications**. Proc. 1996 Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: [s.n.].
24. ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 22, n. 2, p. 439-449, 2007.
25. SERA, D. et al. **Improved MPPT method for rapidly changing enviromental conditions**. Proc. 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [S.l.]: [s.n.]. p. 1400-1425.
26. NEW Procedure for Measuring Dynamic MPP-Tracking Efficiency at Grid-Connect PV Inverters. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg, Germany: [s.n.]. 21-25 September 2009.