

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

AMAURY LEITE MALTA

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO COMO CARREGADOR DE BATERIAS**

VIÇOSA  
2013

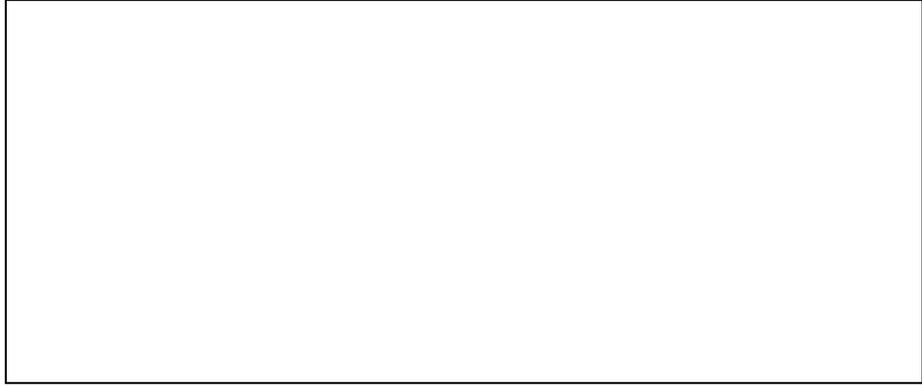
AMAURY LEITE MALTA

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO COMO CARREGADOR DE BATERIAS**

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. Dr. José Tarcísio Resende.

VIÇOSA  
2013



**AMAURY LEITE MALTA**

**COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COMO CARREGADOR BATERIAS**

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 20 de dezembro de 2013.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. José Tarcísio Resende - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. M. Sc. Heverton Augusto Pereira - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. M. Sc. Francisco Carlos Rodrigues Coelho - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“A vida pode nos derrubar, mas só nós podemos escolher se queremos levantar novamente”*

*Mestre Miyagi*

*À minha família, Neide, Loi e Priscilla.*

## *Agradecimentos*

Aos meus pais, Neide e Amaury que sempre se esforçaram para me dar o melhor e ajudaram a vencer minhas dificuldades, a Priscilla, que além de minha irmã é uma grande mãe e companheira que ajudou muito na adaptação à mudança.

À Beatriz pelo apoio, com seu carinho se tornou uma das pessoas mais importantes em minha vida. Aos seus pais que também me aconselharam positivamente.

Aos meus amigos de Remédios, Alisson, Dedé, Kikin, Caio, Leone, Rod e Jackson que torceram por mim, pelos momentos que tivemos antes de ir “cada um prum lado”.

Agradeço ao Allan Cupertino, que muito me ajudou e ensinou nos projetos do Gesep, e que junto com o grande João me proporcionaram a ajuda necessária para escrever essa monografia.

Ao meu professor Heverton Augusto, que se empenhou em ajudar e exigir um pouco de profissionalismo para se realizar bons trabalhos.

A todo pessoal do Gesep, Adriano, Fernando, Luan, Wnister, Valentim, Tiago, Silas, Eduardo, Filipe, Samuel, César com as experiências de projetos e trabalhos.

Agradeço também ao pessoal da república, Barraka Armada, Calipso, Filipe, Babidi e aos agregados Irmão Urso, Baianinho, Monlevade, Bonzai, Bruno, Edu, Roger (sem o qual nem teria formado), Capixaba, Zé Pequeno e tantos outros; pelas resenhas, as brincadeiras e as risadas, a quem considero como uma família.

## ***Resumo***

Nesta monografia é apresentado um projeto de um carregador de baterias usando um sistema fotovoltaico autônomo e de baixa potência. A eficiência de um painel solar depende principalmente da irradiância recebida e da temperatura das células. Mas, para que a máxima potência em uma determinada condição climática seja extraída, são utilizados algoritmos para buscar o ponto de máxima potência. Os algoritmos de MPPT consistem no cálculo da tensão de referência do painel fotovoltaico. Essa referência é usada por um compensador PI para calcular o *duty cycle* de um conversor *buck*, controlando assim a tensão que o painel pode entregar para o carregamento de uma bateria. Os algoritmos influenciam diretamente no desempenho do sistema fotovoltaico como carregador de bateria. Por isso, foram comparados quatro algoritmos de MPPT citados na literatura: Tensão Constante, Perturba e Observa, Condutância Incremental e Correlação de Ripple.

## *Abstract*

This final paper presented a project of a battery charger using an isolated, low-power photovoltaic system. The efficiency of a solar panel depends mainly on the temperature and radiation received cells. In order to deliver the maximum power during a given climate condition are used maximum power point algorithms. The MPPT algorithms consist in calculating the reference voltage of the photovoltaic panel. This reference is used by a PI compensator to calculate the duty cycle of a buck converter, which controls the voltage of the panel. The algorithms directly influence the performance of the PV system as a battery charger. Therefore, four MPPT algorithms cited in the literature were compared: Constant Voltage, Perturb and Observe, Incremental Conductance and Ripple Correlation Control.

## *Sumário*

Lista de Figuras .....	11
Lista de Tabelas.....	12
1 Introdução.....	13
1.1 A Energia Solar no Brasil.....	13
1.2 Objetivos e Motivação.....	15
2 Revisão Bibliográfica.....	16
2.1 Painel Fotovoltaico .....	16
2.1.1 Princípio de Funcionamento.....	16
2.1.2 Modelo Equivalente de um Painel Fotovoltaico.....	17
2.1.3 Características de um Painel Fotovoltaico .....	18
2.1.4 Efeitos Meteorológicos nas Características do Painel Solar.....	19
2.2 Conversor Buck .....	21
2.3 Baterias .....	22
2.4 Seguidor de Máxima Potência.....	23
2.4.1 Tensão Constante (CV) .....	24
2.3.2 Perturba e Observa (P&O).....	25
2.3.3 Condutância Incremental (IncCond) .....	25
2.3.4 Correlação de Ripple (RCC) .....	27
3 Metodologia.....	28
3.1 Modelagem do Painel Solar.....	28
3.2 Modelagem da Bateria.....	29
3.3 Modelagem do Buck.....	30
3.4 Controle do Sistema .....	30
3.5 MPPT.....	33
4 Resultados e Discussões.....	35
4.1 Comparação entre Algoritmos de MPPT.....	35
4.2 Análise do Compensador PI .....	39
5 Conclusão .....	42
Referências Bibliográficas .....	43

## *Lista de Figuras*

Figura 1 – Capacidade instalada em GW de painéis fotovoltaicos no mundo [2].....	14
Figura 2 - Irradiação total ao longo do Brasil [3].....	15
Figura 3 - Circuito equivalente de painel fotovoltaico.....	17
Figura 4 - Curva características de um painel solar.....	19
Figura 5 – Curvas $I \times V$ , para alguns níveis de radiação [5]. ....	20
Figura 6 - Curvas $I \times V$ , para alguns valores de temperatura [5]. ....	20
Figura 7 - Modelo de conversor Buck.....	21
Figura 8 - Modos de funcionamento do conversor Buck. (a) Contínuo (b) Descontínuo. ....	22
Figura 9 – (a) Corrente do indutor e (b) Tensão na chave do <i>buck</i> [6]. ....	22
Figura 10- Curvas $V \times I$ para vários níveis de radiação e temperatura constante. ....	24
Figura 11 – Algoritmo MPPT para perturbação e observação .....	25
Figura 12– Algoritmo Condutância Incremental.....	26
Figura 13- Diagrama de blocos do método RCC. ....	27
Figura 14 - Montagem do sistema carregador de baterias.....	28
Figura 15 - Modelo circuital usado para simular dispositivo fotovoltaico.....	29
Figura 16- Curva $I \times V$ do painel e sua linearização em torno do MPP.....	31
Figura 17 - Resposta ao degraú do sistema com PI.....	33
Figura 18- Controlador PI aplicado ao <i>buck</i> .....	33
Figura 19 - Perfil de irradiância do painel solar.....	35
Figura 20 - Tensão de referência de cada MPPT.....	36
Figura 21- Potência do painel PV.....	36
Figura 22 - Potência do painel PV ampliada nas mudanças de irradiância.....	37
Figura 23 - Tensão de saída do painel PV.....	37
Figura 24 - Tensão de saída do painel PV ampliada nas mudanças de irradiância.....	38
Figura 25 - Corrente da bateria para os algoritmos P&O e IncCond. ....	38
Figura 26 - Corrente na bateria para os algoritmos CV e RCC.....	39
Figura 27 - Estado de carga (SOC) da bateria.....	39
Figura 28 - Comparação da tensão do painel PV com e sem compensador PI. ....	40
Figura 29 - Comparação da corrente do painel PV com e sem compensador PI. ....	40
Figura 30 - Comparação da potência do painel PV com e sem compensador PI.....	41

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 – Parâmetros painel fotovoltaico à 1000 W/m <sup>2</sup> e temperatura ambiente 25°C. ....	28
Tabela 2 – Parâmetros característicos da bateria. ....	29
Tabela 3 – Parâmetros do conversor Buck. ....	30

# ***1 Introdução***

Devido ao aumento da utilização de equipamentos elétricos e o desenvolvimento industrial de alguns países ocorrido nos últimos anos, ocorreu um aumento na demanda por fontes de energia. Como a maior parte da energia mundial é proveniente da combustão de derivados fósseis, que além de não serem renováveis, geram poluição atmosférica, a busca por fontes alternativas renováveis tem sido bastante estudada a fim de aumentar a diversidade da matriz energética do mundial.

Entre as fontes alternativas, a que vem ganhando mais destaque é a energia fotovoltaica, que além de não gerar poluentes, não emitir sons e necessitar de baixa manutenção, pode ser colocada em construções já existentes, sendo instalada em fachadas, nos telhados e paredes de prédios, residências, áreas rurais e várias outras [1].

Existem diversas políticas de desenvolvimento dessa tecnologia, possibilitando melhorias na eficiência e diminuição do custo dos módulos. Há também os incentivos governamentais, que propiciam maior utilização da energia fotovoltaica. Com isso, o uso dessa forma de energia vem se tornando cada vez mais acessível [1].

Como visto na Figura 1, o uso da energia fotovoltaica tem crescido nos últimos anos. Até 2012 haviam sido instalados 102 GW em sistemas fotovoltaicos, um crescimento de 31 GW em relação a 2011, o que significa quase 50% a mais em 2012. Além disso, pode-se salientar sobre como políticas públicas fizeram com que o continente europeu, liderados principalmente pela Alemanha e Itália, esteja bem à frente em relação à produção de energia fotovoltaica [2].

## ***1.1 A Energia Solar no Brasil***

No Brasil, a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos ainda é pouco explorada. Sendo priorizada à construção de sistemas fotovoltaicos autônomos, onde existem comunidades isoladas da rede elétrica, principalmente na região Norte e Nordeste. Neste sentido, foram criados alguns programas como PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios) e o Programa Luz para Todos, com objetivo de reduzir a exclusão elétrica do país [1], [3].

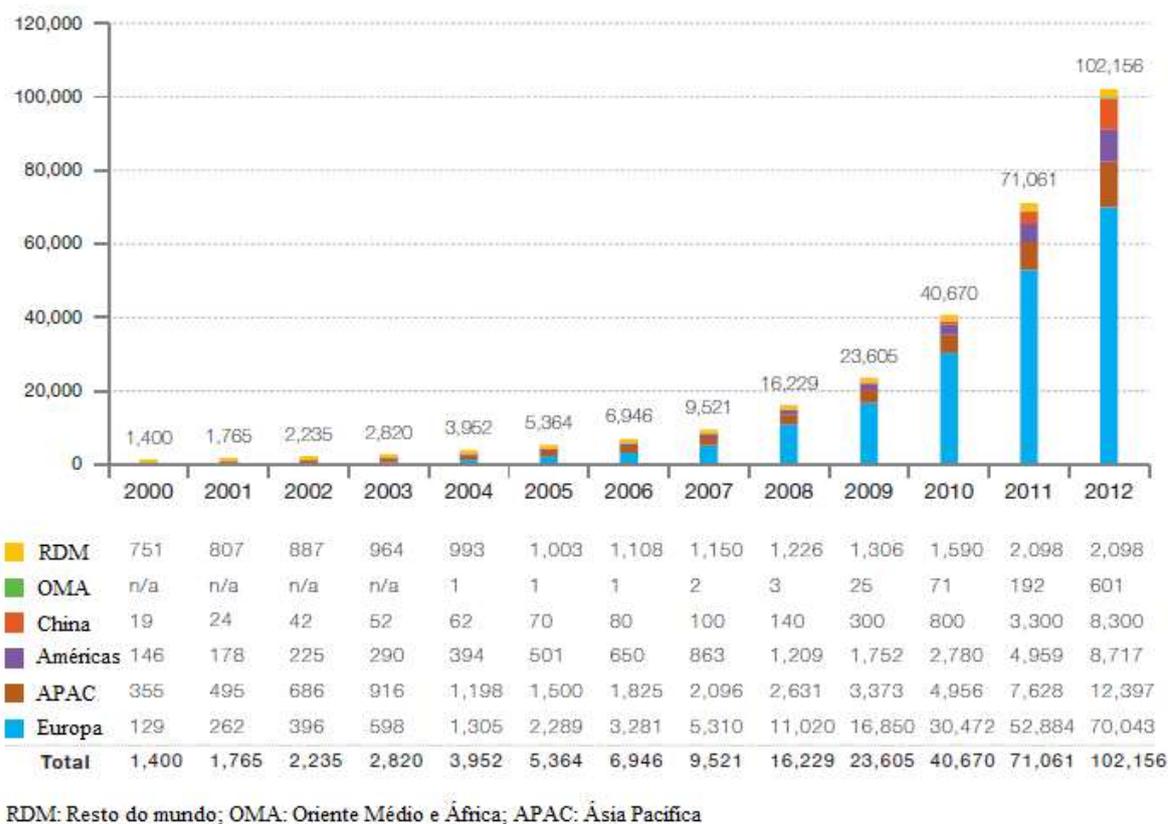


Figura 1 – Capacidade instalada em GW de painéis fotovoltaicos no mundo [2].

Há também que se considerar o preço da instalação de painéis fotovoltaicos no país, a falta de tecnologia nacional para produção de painéis e componentes eletrônicos relacionados aos conversores necessários para conexão à rede. O custo torna a instalação de painéis fotovoltaicos bastante elevado quando comparada a energia hidrelétrica, principal forma de produção elétrica brasileira. Além disso, a ideia de conectar uma fonte solar à rede ainda está sendo estudada, como ideias de *smart-grid*, onde cada sistema ligado à rede pode funcionar como uma pequena usina solar. Em 2012 a ANEEL deu um passo em direção a isso com a criação da resolução 482, que estabelece as condições gerais para a microgeração e minigeração aos sistemas de distribuição de energia elétrica, através do sistema de compensação de energia elétrica, sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora onde os créditos foram gerados [3].

O mapa da Figura 2 apresenta a irradiação solar global (média anual) do Brasil. Observa-se que o país possui boa irradiação solar por sua localização tropical. Além disso,

observa-se concentração de irradiação média diária entre 4,8 e 6,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia, enquanto que na Alemanha o valor máximo é 3,4 kWh/m<sup>2</sup>. Ou seja, o local com menor insolação no Brasil é melhor que o de maior insolação na Alemanha, sendo este o país com maior capacidade instalada em energia fotovoltaica [3].

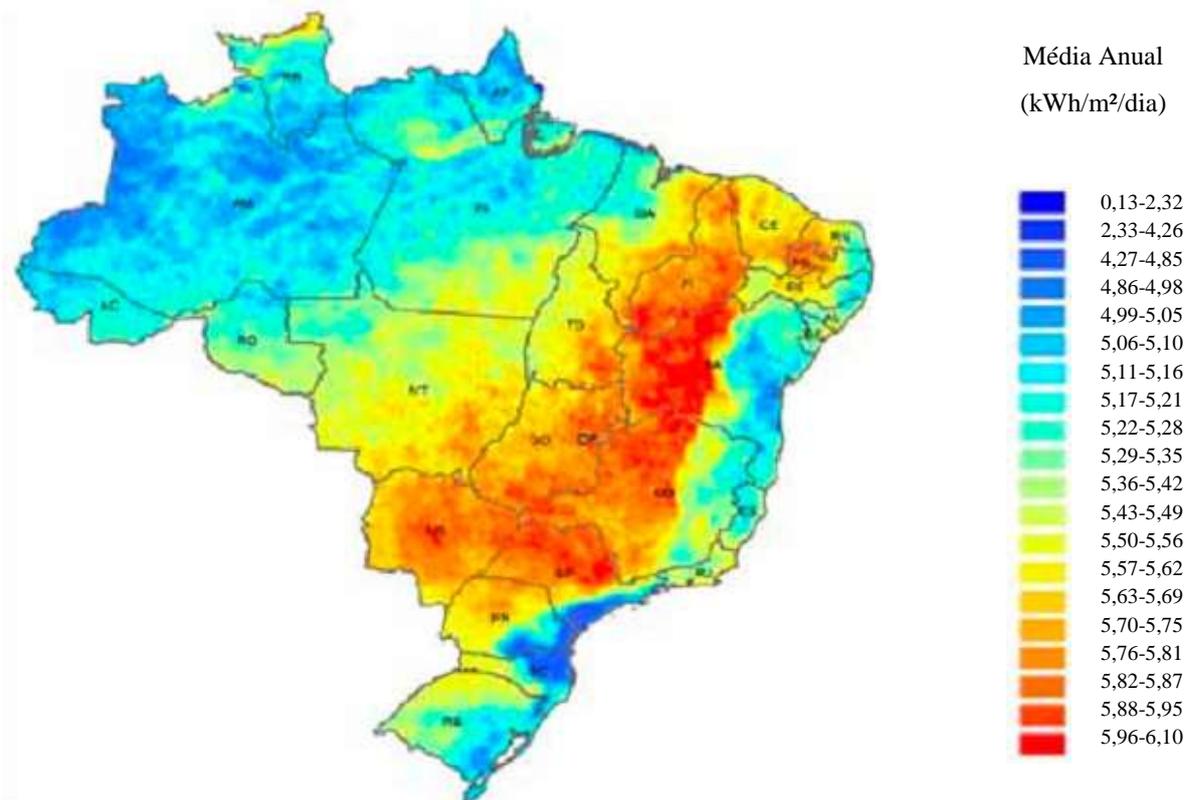


Figura 2 - Irradiação total ao longo do Brasil [3].

## 1.2 Objetivos e Motivação

O objetivo principal desta monografia é projetar e simular um carregador de baterias a partir de um sistema fotovoltaico. Foi utilizado um conversor Buck para controlar o painel fotovoltaico e ser a ligação entre o painel e a bateria. A partir daí, os elementos que compõe o modelo foram dimensionados e simulados, variando algoritmos de máxima potência para determinar qual seria o mais eficiente para esse sistema.

A motivação da pesquisa se deve ao grande potencial energético fotovoltaico no Brasil. Estudando-se formas para melhorar a eficiência de um painel solar, espera-se que haja maior uso desta forma de energia, junto com a conscientização de que a energia solar pode se tornar a principal forma de produção de energia mundial.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Painel Fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que eletrodos metálicos, mergulhados num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostos à luz [4].

Mais tarde, em 1877, dois inventores norte-americanos, W.G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz, com eficiência por volta de 0,5%. Só em 1953, Calvin Fuller descobriu que a dopagem do silício produzia uma célula fotovoltaica muitas vezes superior a de selênio, até então utilizada, chegando a 6% de eficiência. Ainda hoje, as principais células são compostas de silício multicristalino, que vêm se desenvolvendo cada vez mais, chegando perto de 40% em laboratório [4].

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

Uma célula solar é um elemento que pode ser considerado um diodo com a junção p-n que, ao sofrer a incidência de radiação eletromagnética, irá produzir energia elétrica. No momento em que os fótons da luz incidem na célula solar haverá a formação de pares elétrons-*gap*. Daí, os elétrons produzidos irão fluir para o lado tipo n e os *gaps* irão para o lado tipo p, este fluxo de elétrons será responsável pelo surgimento de corrente.

A taxa de geração de pares de elétrons e lacunas no semicondutor é determinada pelo fluxo luminoso incidente no dispositivo e pela capacidade de absorção do material semicondutor. A capacidade de absorção de fótons depende primariamente da banda de energia (*bandgap*) do semicondutor, da refletância da superfície do dispositivo fotovoltaico (que depende do formato e do tratamento da superfície), da concentração intrínseca de portadores do semicondutor, da mobilidade eletrônica, da taxa de recombinação, da temperatura e de diversos outros fatores [5].

Cada célula sozinha produz baixa 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 pode ser posto em série ou paralelo com outros para aumentar ainda mais a potência produzida [1].

### 2.1.2 Modelo Equivalente de um Painel Fotovoltaico

Um modelo de uma célula solar em forma de circuito elétrico pode ser visto na Figura 3. Neste circuito, as resistências existentes representam as perdas de um painel real. As resistências em série ( $R_s$ ) e em paralelo ( $R_p$ ) representam, respectivamente, as quedas de tensão quando a carga migra a partir dos contatos elétricos e a queda de tensão devido à corrente de fuga reversa do diodo e  $I_{pv}$  é uma fonte de corrente contínua cujo valor será calculado mais à frente.

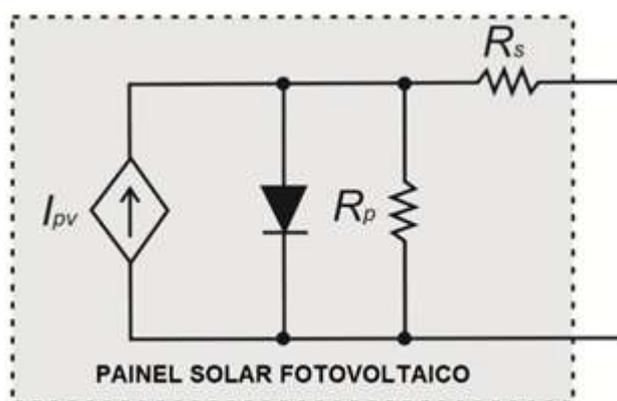


Figura 3 - Circuito equivalente de painel fotovoltaico.

Os parâmetros  $R_s$  e  $R_p$  podem ser calculados através de (1) e (2), que foram obtidas a partir da linearização da curva  $I \times V$  do painel, no ponto de máxima potência. Sabendo que,  $V_{mp}$  é a tensão na máxima potência e  $I_{mp}$  é a corrente na máxima potência.

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{mp}} \quad (2)$$

Já a corrente do painel é dada por (3).

$$I = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{V + I R_s}{a V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (3)$$

Onde  $I_{pv}$  é dado por (4) e  $I_{pv_n}$  é a corrente em condições nominais, dada por (5) .

$$I_{pv} = (I_{pv_n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{ref}} \quad (4)$$

$$I_{pv_n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc_n} \quad (5)$$

$\Delta T = T - T_n$  ( $T$  é a temperatura do painel solar e  $T_n$  é a temperatura do painel solar nas condições nominais);  $G$  e  $G_{ref}$  são os valores de radiação solar incidente e a radiação de referência ( $W/m^2$ ), respectivamente.  $K_i$  é o coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito (A/K). A corrente de fuga reversa do diodo,  $I_0$  é:

$$I_0 = \frac{I_{sc_n} + K_i \Delta T}{e^{\left( \frac{(V_{oc_n} + K_v \Delta T)}{a V_t} \right)} - 1} \quad (6)$$

$I_{sc_n}$  é a corrente de curto-circuito nominal,  $V_{oc_n}$  é a tensão de circuito aberto nominal e  $K_v$  é o coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (V/K). A variável  $a$  é a constante de idealidade do diodo, que varia de  $1 \leq a \leq 1.5$ . Finalmente  $V_t$  é calculado por (7).

$$V_t = \frac{k T}{e} \quad (7)$$

Onde  $k$  é a constante de Boltzman,  $T$  é a temperatura do painel (K),  $e$  é a carga de um elétron [5].

### 2.1.3 Características de um Painel Fotovoltaico

A Figura 4 apresenta as curvas típicas de painéis fotovoltaicos. Nota-se que a máxima corrente que pode ser fornecida pelo painel solar é a corrente no curto-circuito  $I_{sc}$ , caracterizado pela tensão de zero Volt. Assim como a maior tensão possível é a de circuito aberto  $V_{oc}$ , onde a corrente é zero. Além disso, está marcado o ponto de máxima potência da curva  $P_{max}$ , sendo possível então encontrar a tensão e corrente na máxima potência ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

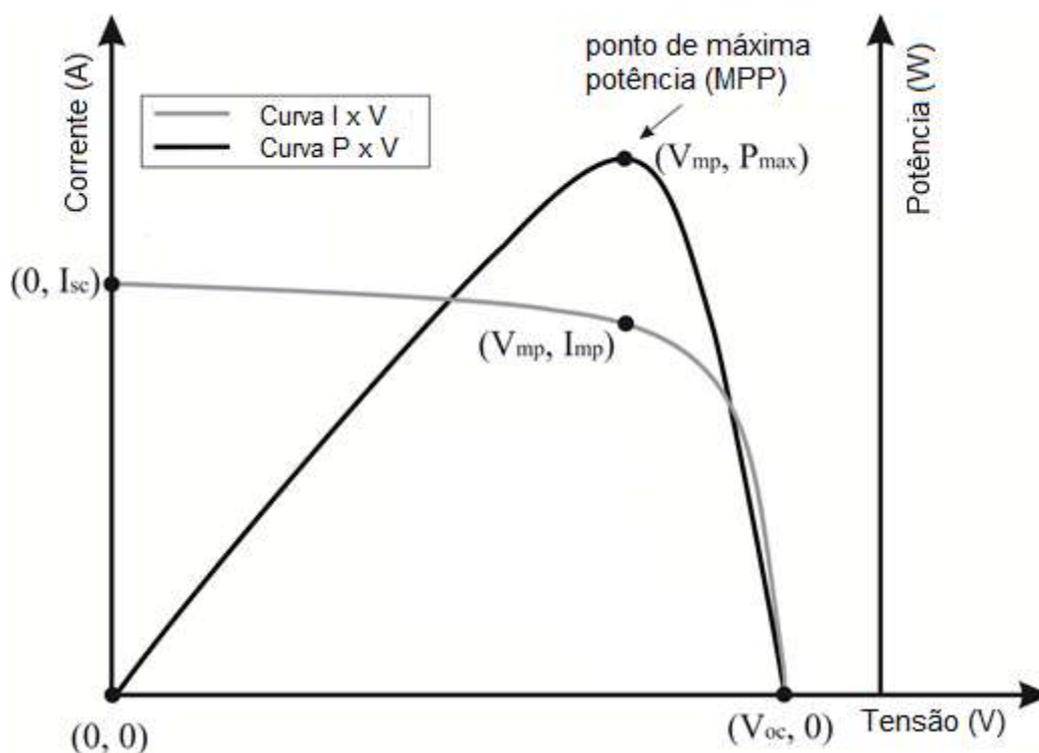


Figura 4 - Curva características de um painel solar.

#### 2.1.4 Efeitos Meteorológicos nas Características do Painel Solar

Na Figura 4, as curvas características apresentadas são verdadeiras apenas para um valor de temperatura e irradiância do painel solar. Quando algum desses valores varia, a produção de energia do painel também se altera, conforme apresentado na Figura 5 e na Figura 6.

Conforme a irradiância diminui, a corrente que o painel pode produzir diminui significativamente, enquanto que a tensão pouco varia. De forma parecida, quando a temperatura aumenta a tensão que pode ser produzida diminui bastante, enquanto que a corrente abaixa pouco. Nos dois casos, com o aumento da temperatura ou diminuição da radiação, a potência gerada diminui de acordo com a corrente ou tensão, já que é calculada como produto destes.

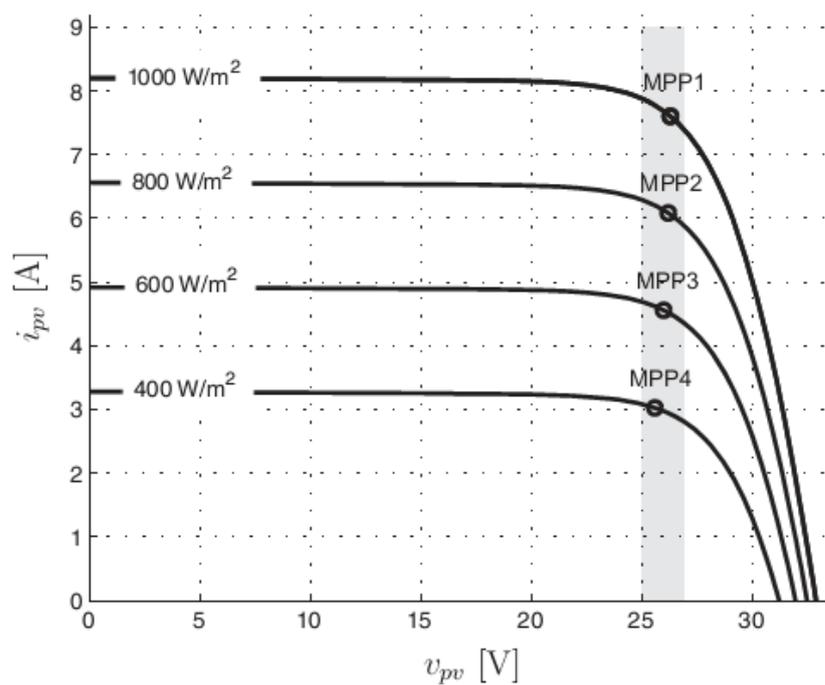


Figura 5 – Curvas I x V, para alguns níveis de radiação [5].

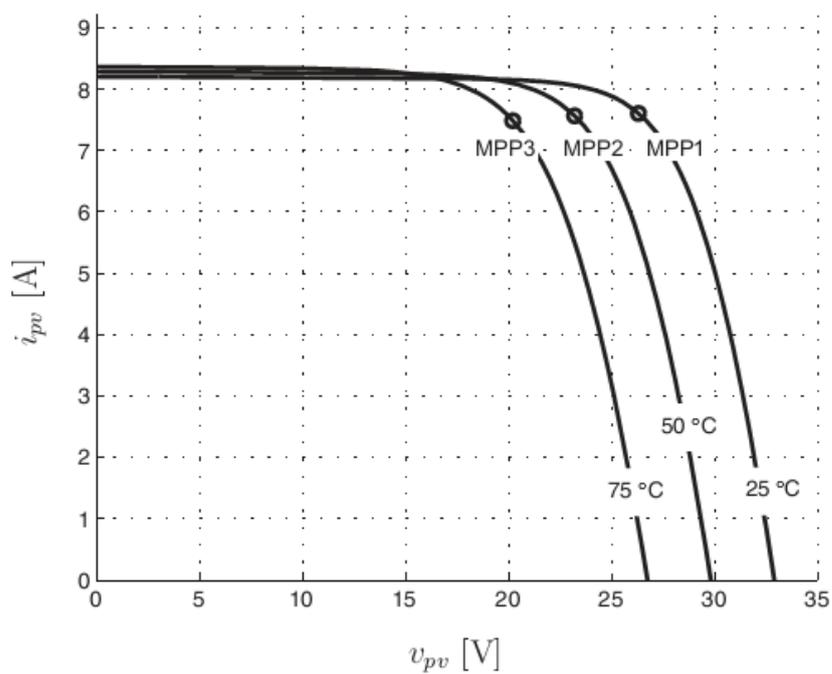


Figura 6 - Curvas I x V, para alguns valores de temperatura [5].

## 2.2 Conversor Buck

Um conversor CC-CC recebe um nível de corrente ou tensão contínua nos terminais de entrada e ajustam para outro valor de tensão ou corrente contínua na saída. No caso do conversor *buck*, também chamado de *Step-Down* ou abaixador de tensão, a saída apresenta a tensão menor que a de entrada. Na Figura 7, é apresentada uma topologia típica de um *buck* usado no sistema fotovoltaico [1].

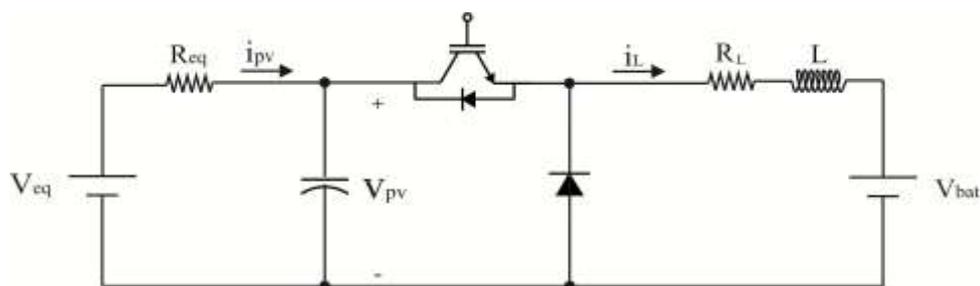
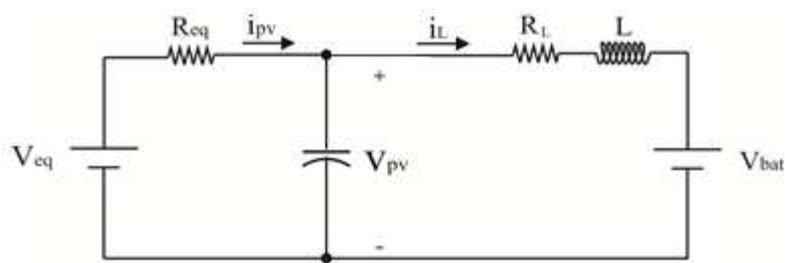


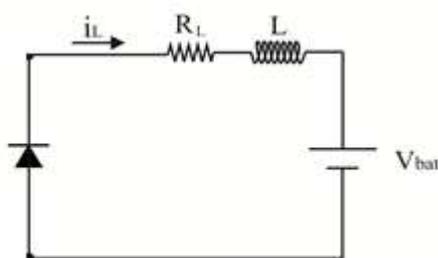
Figura 7 - Modelo de conversor Buck.

Os conversores CC-CC apresentam dois modos de condução, um quando a chave S está fechada e carregando o indutor, chamado modo contínuo; e o modo descontínuo, quando a chave abre e o indutor fornece a corrente à carga, como mostrado na (b)

Figura 8.



(a)



(b)

Figura 8 - Modos de funcionamento do conversor Buck. (a) Contínuo (b) Descontínuo.

Se esse chaveamento tiver uma frequência alta o bastante o indutor não se descarregará, logo a corrente que chega à bateria será relativamente constante como mostra a Figura 9.

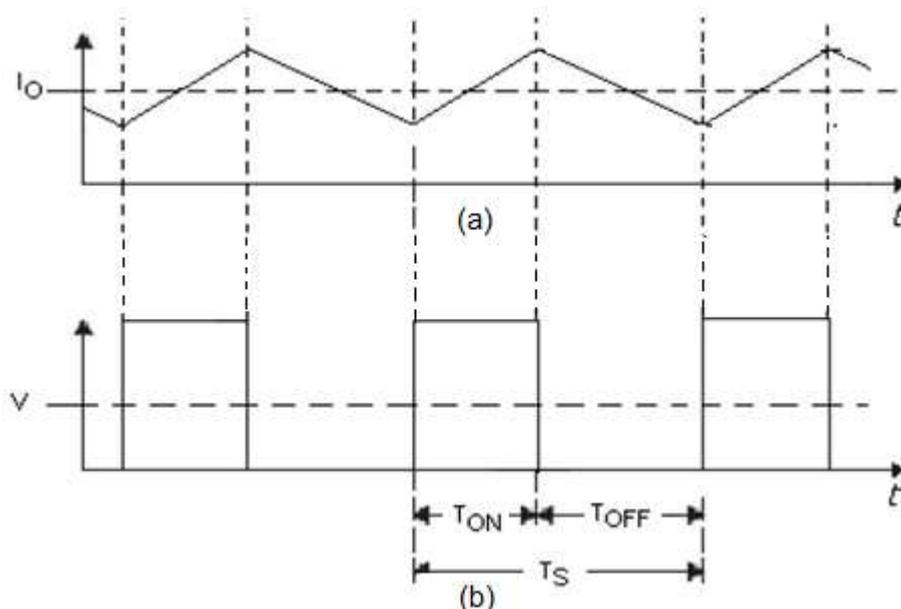


Figura 9 – (a) Corrente do indutor e (b) Tensão na chave do buck [6].

A decisão de quando abrir ou fechar a chave é feita por um modulador de pulso (PWM), que dita qual será o ciclo de trabalho (conhecido como *duty-cycle*) da chave. No conversor *buck*, esse ciclo é dado pelo tempo em que a chave fica fechada sobre o período total do chaveamento, mas também pode ser obtido através das relações de tensão de entrada e saída, como em (8)(5).

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{V_{bat}}{V_{pv}} \quad (8)$$

### 2.3 Baterias

Baterias são conhecidas por serem uma eficiente forma de armazenamento de energia. Quando uma bateria está conectada a um circuito elétrico, há corrente devido a uma transformação eletroquímica no seu interior, ou seja, há produção de corrente contínua através da conversão de energia química em energia elétrica. Elas podem ser classificadas em duas categorias, a primária, que uma vez esgotada a produção de energia elétrica, deve ser

descartada. E a secundária, que pode ser recarregada quando se aplica uma fonte de tensão ou corrente e elétrica nos seus terminais, invertendo o processo eletroquímico [7].

Existem diversos tipos de baterias utilizando tecnologias e materiais diferentes que resultam em equipamentos de tamanhos, pesos, capacidades de armazenamento, custos e durabilidades diferentes, além de baterias especificamente projetadas para sistemas fotovoltaicos que levam em conta as características próprias desse tipo de aplicação.

As baterias mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são de 12 V de tensão nominal. No entanto, a tensão apresentada pode variar dependendo da carga ou do fornecimento de energia. Normalmente, a bateria está totalmente carregada em torno de 14,3 V, não recebendo mais corrente. Quando atinge 11,3 V as cargas devem ser desligadas, para recarga da bateria. Estas providências aumentam a vida útil da bateria [8].

Quanto maior é a capacidade da bateria em armazenar energia, maior o tempo que se pode suprir energia quando há ausência de radiação solar. A capacidade das baterias determina 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, vida útil termina. O que significa necessidade de 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 [8].

## **2.4 Seguidor de Máxima Potência**

A potência fornecida por um painel fotovoltaico sofre variações ao longo do dia, causadas por efeitos temporais, sombreamento, época do ano entre outras. Esses fatores alteram o ponto de operação do sistema, que muda a curva característica de tensão e de corrente do painel que, por conseguinte altera seu ponto de máxima potência. Assim, rastrear o ponto de máxima potência é algo muito importante, pois ele fornece ao controle o melhor ponto de funcionamento de um painel em determinado instante permitindo obter o máximo rendimento do painel.

Na literatura existem diversos algoritmos para Buscar o Ponto de Máxima Potência ou MPPT (em inglês, *Maximum Power Point Trackers*), quatro deles serão explicados nas próximas seções e serão usados nas simulações deste trabalho.

### 2.4.1 Tensão Constante (CV)

O algoritmo de tensão constante calcula a tensão no ponto de máxima potência  $V_{mpp}$  usando uma fração do valor da tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ . De acordo com (9) a relação entre eles é dada por:

$$V_{mpp} = k_v V_{oc} \quad (9)$$

Onde  $k_v$  é uma constante de proporcionalidade e seu valor normalmente é maior que 0,7 [9], [10] e seu valor é obtido empiricamente, o que torna difícil uma generalização.

Este algoritmo considera que a tensão no ponto de máxima potência apresenta pouca variação. Esse fato é válido apenas se forem consideradas pequenas variações na temperatura dos painéis solares, como mostrado na Figura 10.

Além disso, este método é pouco atrativo pela necessidade de desconectar o painel periodicamente da carga para determinar o valor de  $V_{oc}$  [11].

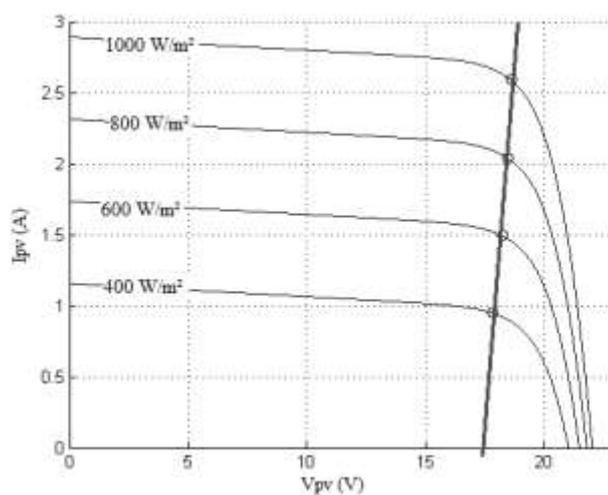


Figura 10- Curvas V x I para vários níveis de radiação e temperatura constante.

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

O algoritmo Perturba e Observa (P&O) é mostrado na Figura 11. Esse método é amplamente usado devido a sua baixa complexidade. Dele se originaram vários métodos como *Modified P&O*, *Hill Climbing* and *Modified Hill Climbing* [10].

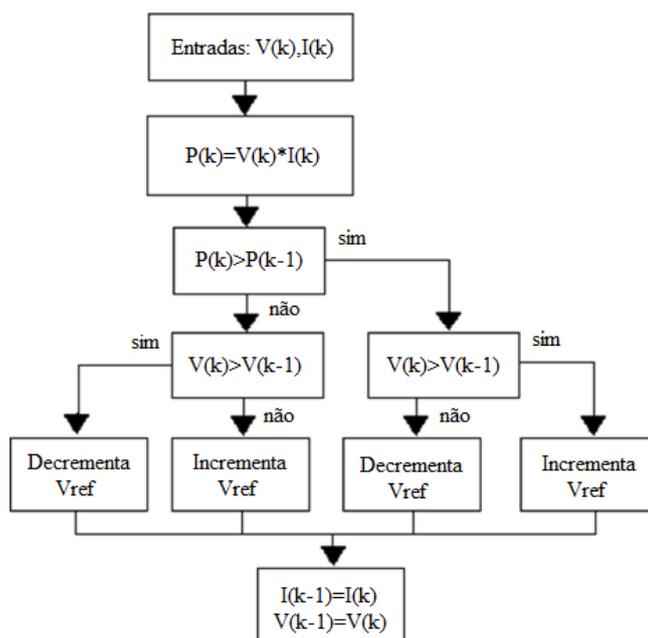


Figura 11 – Algoritmo MPPT para perturbação e observação

Este algoritmo funciona periodicamente incrementando ou decrementando a tensão do de saída do painel fotovoltaico e compara a potência de saída com seu valor anterior. Se a potência entregue aumentou, a direção da perturbação continuará na mesma direção no próximo ciclo, caso contrário, a direção da perturbação muda. Isso significa que a tensão do sistema fotovoltaico será perturbada a cada ciclo. Quando o MPP é alcançado, o algoritmo P&O oscilará em torno dele [5].

### 2.3.3 Condutância Incremental (IncCond)

O algoritmo da Condutância Incremental é frequentemente considerado a melhor técnica baseada no método de Perturbação e Observação. Esse método apresenta bom comportamento em estado estacionário e uma resposta rápida durante mudanças na radiação solar incidente [12].

Essa técnica usa a derivada da curva de potência em relação à tensão ( $dP/dV$ ). Isto garante menores perturbações no estado estacionário do que o método P&O [11].

Portanto, sabe-se que no MPP,  $dP/dV = 0$ . Essa derivada pode ser escrita em termos de tensão e corrente do sistema solar, como mostrado em (10).

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I V)}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \approx \frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (10)$$

O algoritmo periodicamente compara a condutância  $\frac{I}{V}$  com seu incremento  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  [1]. Como visto na Figura 12.

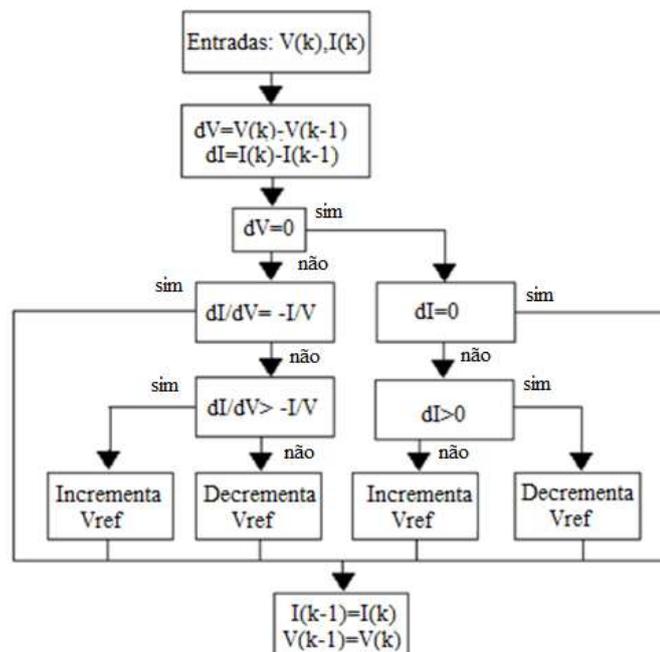


Figura 12– Algoritmo Condutância Incremental.

Note que:

- Se  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ , o algoritmo encontrou o ponto de máxima potência;
- Se  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ , é necessário incrementar a tensão para encontrar a MPP;
- Se  $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$  é necessário decrementar a tensão para encontrar a MPP.

### 2.3.4 Correlação de Ripple (RCC)

O método RCC foi primeiramente apresentado como uma técnica analógica com uma resposta rápida [13]. Apesar disso, já existem algumas propostas de implementação digital na literatura [14].

Esse método usa o *ripple* da potência  $\tilde{p}_{PV}$  e o ripple de tensão  $\tilde{v}_{PV}$  do sistema solar para encontrar a derivada da potência  $dP/dV$ . Para isso, é usado um filtro passa alta de primeira ordem para obter os *ripples* de tensão e potência. Então, usa-se um filtro passa-baixa de primeira ordem para calcular o valor médio da derivada da potência (11). O diagrama deste método é apresentado na Figura 13.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right) \cong \frac{\overline{\tilde{p}_{PV} \tilde{v}_{PV}}}{\tilde{v}_{PV} \tilde{v}_{PV}} \tag{11}$$

Seu funcionamento é tal que, se a tensão aumenta ( $\tilde{v}_{PV} > 0$ ) e a potência aumenta ( $\tilde{p}_{PV} > 0$ ), o ponto de operação está abaixo do MPP. Por outro lado, se  $\tilde{v}$  aumenta e  $\tilde{p}$  diminui, então o ponto de operação está acima do MPP. Portanto, se  $\tilde{v}_{PV} \cdot \tilde{p}_{PV}$  é positivo o ponto de operação está à esquerda do MPP ( $dP/dV > 0$ ); se  $\tilde{v}_{PV} \cdot \tilde{p}_{PV}$  é negativo o ponto de operação está à direita do MPP ( $dP/dV < 0$ ) [14].

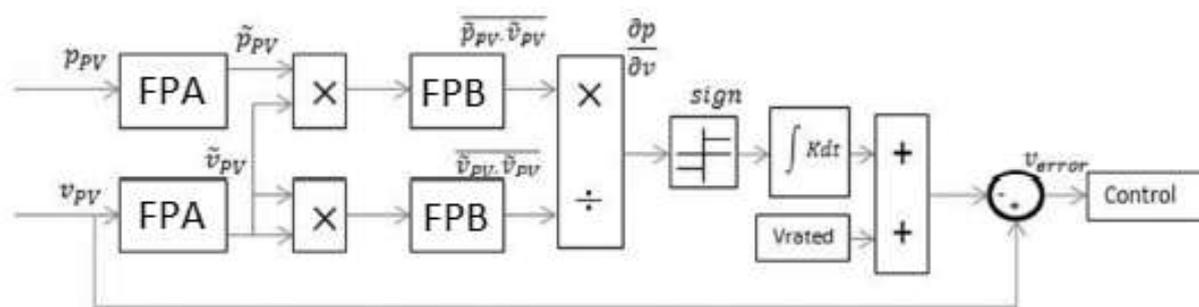


Figura 13- Diagrama de blocos do método RCC.

### 3 Metodologia

O sistema carregador de bateria foi simulado ligando-se seus componentes como mostrado na Figura 14. Para o desenvolvimento desse projeto foi utilizado o *software Matlab/Simulink*. Neste tópicos será explicado como cada parte desta montagem foi simulada.

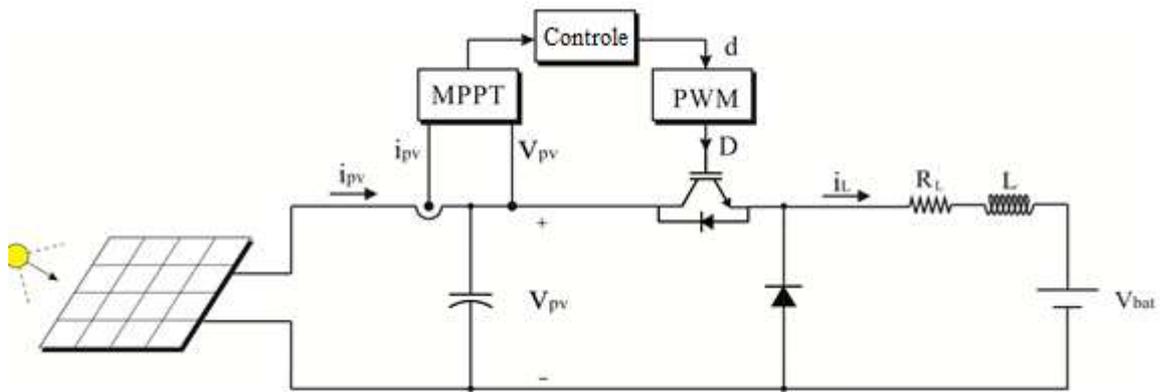


Figura 14 - Montagem do sistema carregador de baterias.

#### 3.1 Modelagem do Painel Solar

A modelagem do painel solar foi feita a partir de um painel cujas características podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros painel fotovoltaico à 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura ambiente 25°C.

Parâmetro	Valor
Resistência Série – $R_s$	0,155 $\Omega$
Resistência Paralelo – $R_p$	115,03 $\Omega$
Tensão de circuito aberto – $V_{oc}$	22,1 V
Corrente de Curto Circuito – $I_{sc}$	2,89 A
Número de Células	36
Temperatura do Painel	47°C
Temperatura do Ambiente	25°C
Fator Idealidade do Diodo	1,05
Coefficiente da Temperatura do $I_{sc}$	0,00166 A/K
Coefficiente da Temperatura do $V_{oc}$	-0,07 V/K

Para simular o painel foi utilizado o esquema proposto em [5], mostrado na Figura 15. Neste modelo, o valor da corrente e tensão medidos na saída do painel são usados para calcular  $I_m$ , atualizando os valores de  $V$ ,  $I$  e  $I_m$  em cada passo da simulação.

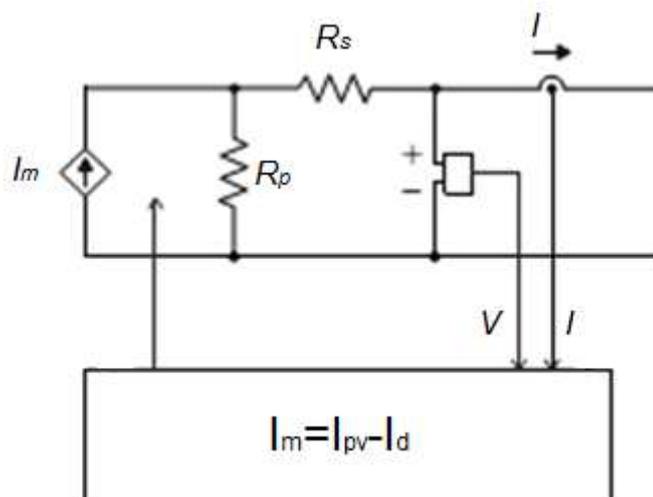


Figura 15 - Modelo circuital usado para simular dispositivo fotovoltaico.

Além disso, como já mostrado anteriormente, a potência varia com a irradiância incidente e temperatura do painel. No entanto, como o tempo de simulação utilizado foi para testar os algoritmos de MPPT, usou-se um tempo curto no qual a radiação muda bruscamente e no qual a temperatura do painel não chega a se alterar, pois variação desta é muito mais lenta.

### 3.2 Modelagem da Bateria

Para o modelo da bateria foi usado o bloco *battery* já existente no *software Matlab/Simulink*. Os seus parâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros característicos da bateria.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	12V
Capacidade nominal	6 Ah
Estágio inicial de carga	20%
Capacidade Máxima	7 Ah
Tensão em Carga Completa	14,14 V
Corrente Nominal de Descarga	6,25 A
Resistência Interna	0,018 $\Omega$

Escolheu-se bateria de Níquel-Hidreto Metálico que apesar de ter o preço inicial maior que a de Chumbo-Ácido, apresenta melhores características quanto à robustez e velocidade de carregamento [8].

### 3.3 Modelagem do Buck

De acordo com [6] as equações (12) e (13) podem ser usadas para calcular os componentes do *buck*. Os seus parâmetros são mostrados na Tabela 3.

$$L = \frac{V_g D(1 - D)}{f \Delta I} \quad (12)$$

$$C = \frac{V_g D(1 - D)}{8L f^2 \Delta V_c} \quad (13)$$

Tabela 3 – Parâmetros do conversor *buck*.

Parâmetro	Valor
Indutor – $L$	2,0 mH
Capacitor no Painel – $C_p$	0,9 mF
Tensão de saída – $V_{bat}$	12 V
Frequência de chaveamento – $f_s$	10 kHz
Resistência do Indutor – $R_L$	0,1 $\Omega$

### 3.4 Controle do Sistema

Ao invés de utilizar o valor da tensão de entrada e a tensão de saída para calcular o *duty cycle* do conversor, fez-se uso de um controlador PI a fim de melhorar a potência transmitida. Para isso, foi usada a diferença entre o valor da tensão referência calculada pelo MPPT e a tensão produzida pelo painel, a saída desse PI fornece o valor de *duty*. Primeiramente deseja-se fazer a função transferência do sistema, relacionando o tensão de entrada ao *duty* utilizando a linearização do *buck* [6].

Na modelagem do conversor *buck*, o painel é linearizado em torno do MPP e é representado por uma fonte de tensão  $V_{eq}$  e uma resistência  $R_{eq}$  [15], [16]. A Figura 16

apresenta a curva I x V e linearização em torno do MPP. Neste caso,  $V_{eq} = 37.05 \text{ V}$  e  $R_{eq} = 7.15 \Omega$ .

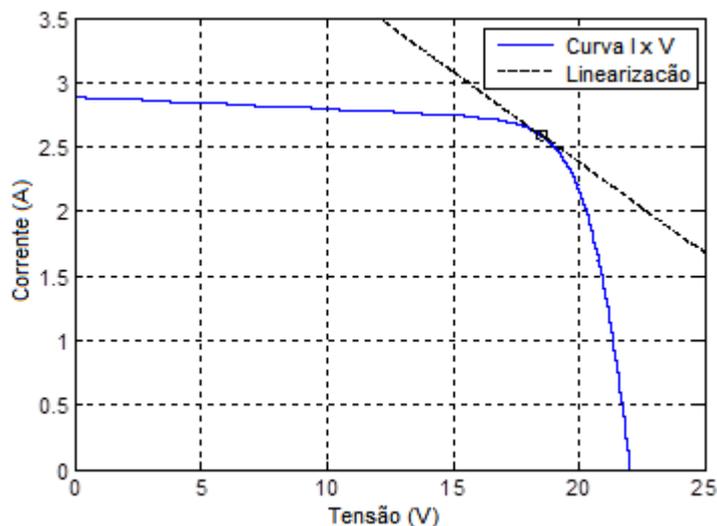


Figura 16- Curva I x V do painel e sua linearização em torno do MPP.

É interessante obter uma única equação para descrever o comportamento de um conversor e assim facilitar sua análise, a equação de estado para o conversor pode ser escrita por (14):

$$\langle \dot{X} \rangle = (A_0 + d \cdot (A_1 - A_0)) \cdot \langle X \rangle + (B_0 + d \cdot (B_1 - B_0)) \cdot \langle U \rangle \quad (14)$$

Onde:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C \cdot R_{eq}} \end{bmatrix}; \quad A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{C \cdot R_{eq}} \end{bmatrix};$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C \cdot R_{eq}} & 0 \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C \cdot R_{eq}} & 0 \end{bmatrix}; \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{pv}}{dt} \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ v_{pv} \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} V_{eq} \\ V_{bat} \\ d \end{bmatrix};$$

< \* > representa o valor médio da variável \*. E  $d$  o valor médio do *duty cycle*.

A Equação (12) é não-linear porque envolve a multiplicação de variáveis temporais. Portanto, para simplificar o problema, é necessário linearizar o modelo. Em [17] se propõe a metodologia baseada em modelo de pequenos sinais. O objetivo é causar pequenas perturbações de algumas variáveis de interesse em torno de um ponto de operação e observar como que o sistema se comporta.

A variável média será perturbada em torno de um ponto de operação sob a condição de que essa amplitude é muito menor do que o seu valor  $dc$ . Com isso desprezamos termos de segunda ordem, viabilizando a linearização como em (15).

$$\begin{cases} d = D + \hat{d} \\ \langle X \rangle = x + \hat{x} \\ \langle U \rangle = u + \hat{u} \end{cases} \quad (15)$$

Substituindo (15) e (14), com algumas manipulações algébricas, tem-se (16).

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_{pv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{eq} \\ \hat{V}_{bat} \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (16)$$

A função transferência relacionando a tensão de entrada ao *duty* é dada por (17). Além disso, o controlador PI usado é dado por (18). A resposta ao degrau usando o PI é apresentada na Figura 17.

$$F_{23}(s) = G_{vd}(s) = \left. \frac{\hat{v}_{pv}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_{eq}, \hat{v}_{bat}=0} \quad (17)$$

$$G_c(s) = 3 + \frac{50}{s} \quad (18)$$

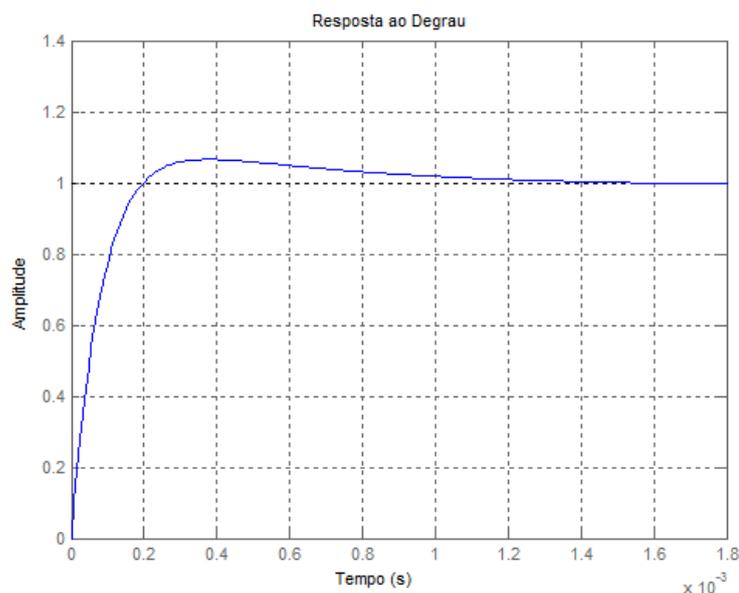


Figura 17 - Resposta ao degrau do sistema com PI.

Uma vista mais detalhada do compensador PI ligado ao *buck* é mostrada na Figura 18. Onde a  $V_{ref}$  é dado pelo MPPT.

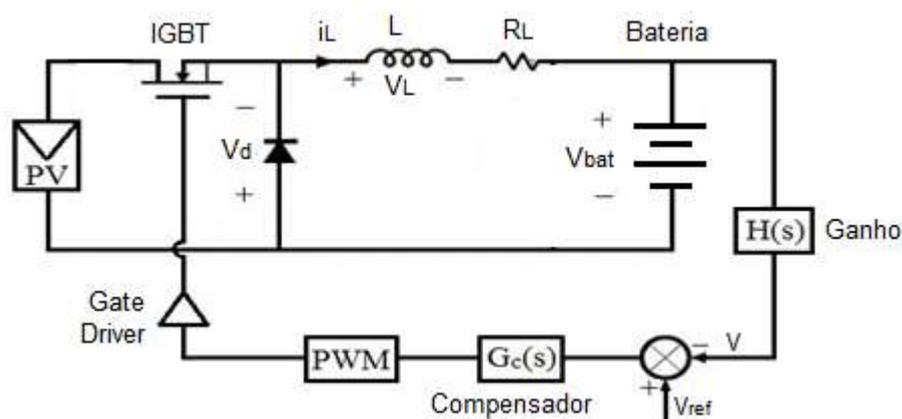


Figura 18- Controlador PI aplicado ao *buck*.

### 3.5 MPPT

Os algoritmos de MPPT são usados para calcular e transmitir a tensão de referência que gerará o erro usado pelo controlador PI para calcular o *duty* do PWM. Cada algoritmo apresenta alguma peculiaridade na sua construção, que serão tratadas a seguir.

O algoritmo de tensão constante trabalha com frequência de amostragem de 10 Hz, ou seja, a chave que desliga o painel do resto do circuito para obter a tensão de circuito aberto abre a cada 0,1 segundos, além disso, a constante empírica obtida foi de  $k_v = 0,8$ . Os

algoritmos de IncCond e o P&O trabalham com frequência de 1000 Hz e o incremento de ambos é constante e com valor de  $\Delta_V = 40 \text{ mV}$ .

Já no método de RCC foram usados filtros de primeira ordem passa-baixa e alta, todos eles com frequência de corte de 300 Hz. A função *sign* dá valor 1 se a derivada é positiva; zero se a derivada é zero e -1 caso a derivada seja negativa.

## 4 Resultados e Discussões

O painel fotovoltaico foi simulado mantendo-se constante sua temperatura e variando apenas os níveis da irradiância solar. A Figura 19 mostra a irradiância usada na simulação, daí foram analisados os resultados para cada algoritmo MPPT.

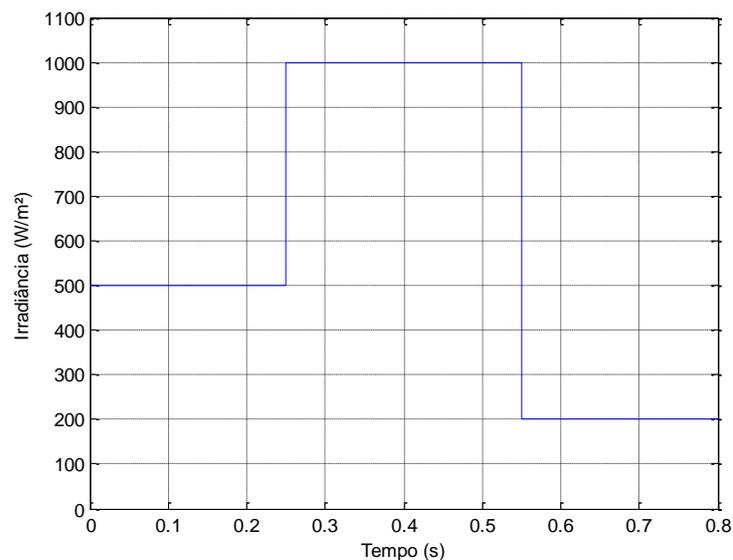


Figura 19 - Perfil de irradiância do painel solar.

### 4.1 Comparação entre Algoritmos de MPPT

A Figura 20 mostra a  $V_{ref}$  obtida a partir do cálculo do algoritmo de MPPT. Essa tensão é subtraída da existente no painel, usando o erro para que o PI calcule o *duty* que deve ser enviado ao *buck*.

A potência extraída do painel PV para os algoritmos de MPPT utilizados neste trabalho é mostrada na Figura 21 e mais detalhadamente na Figura 22. Pode-se perceber o fato de que o algoritmo de Tensão Constante não alcançar a mesma potência que os outros métodos, além do fato de que a cada 0,1 segundo a potência cai pra zero com o desligamento do painel da rede para obtenção de  $V_{oc}$ . Entre os outros métodos, pode-se ver que o de Correlação de Ripple chega mais rápido ao ponto estacionário, enquanto que os de Condutância Incremental e Perturba & Observa chegam quase ao mesmo tempo. Quando

decai de 1000 a 200 W/m<sup>2</sup>, a diferença entre os dois últimos métodos e o de RCC é de cerca de 0,02 seg.

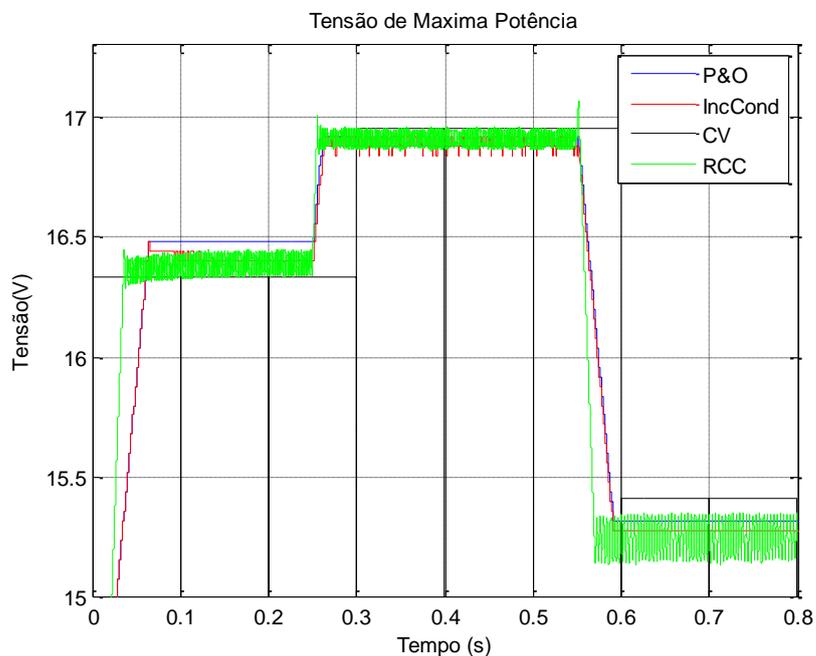


Figura 20 - Tensão de referência de cada MPPT.

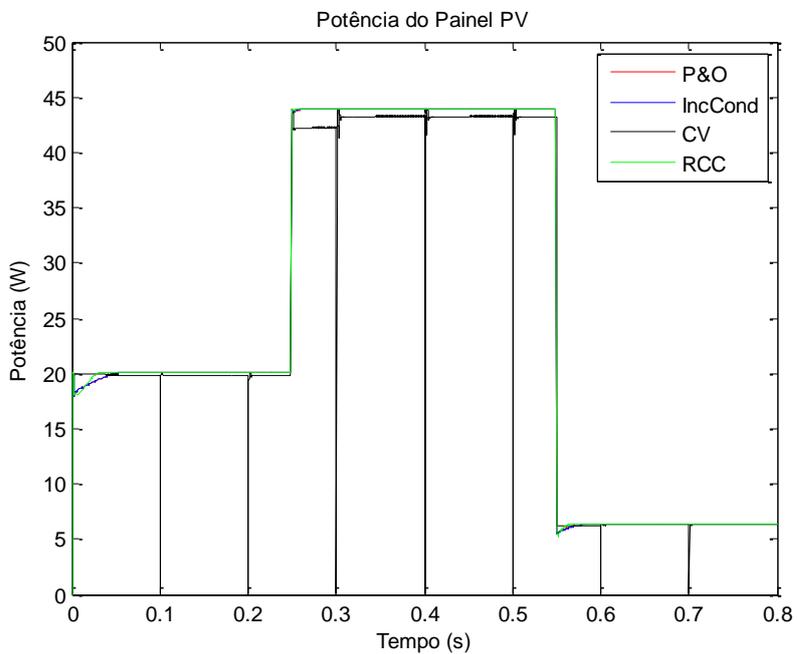


Figura 21- Potência do painel PV.

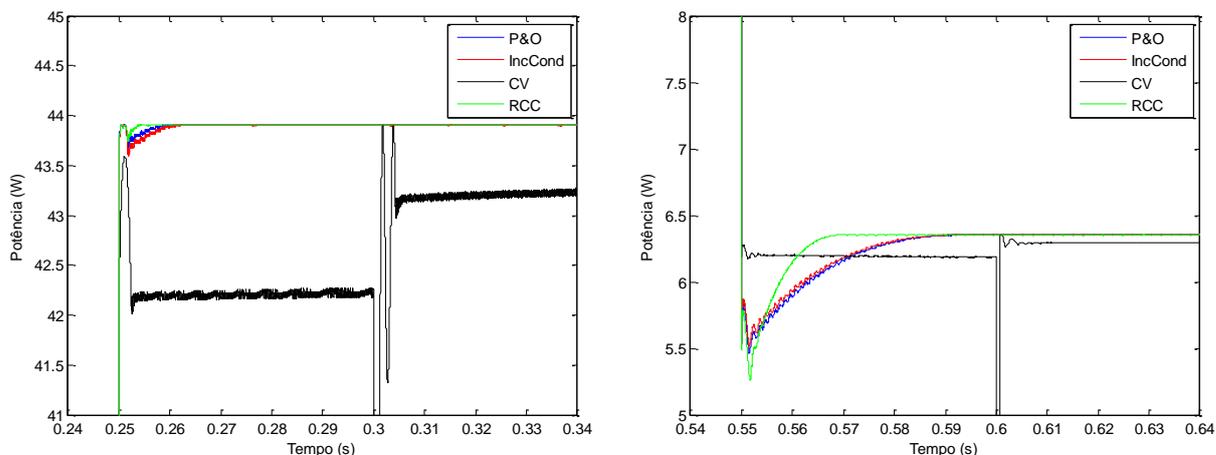


Figura 22 - Potência do painel PV ampliada nas mudanças de irradiância.

Em relação à tensão do painel, o método RCC apresenta a resposta mais rápida como é mostrado na Figura 23 e na Figura 24. Sendo que os algoritmos de P&O e IncCond chegam ao estado estacionário depois de 0,01 seg quando a irradiância aumenta e 0,02 seg quando ela diminui. Uma forma de se aumentar a velocidade de ambos os algoritmos, seria alterar o incremento  $\Delta v$ , no entanto, se se fizer isso aumentaria o ripple da tensão, como ocorre com o RCC. O método CV utiliza a tensão de circuito aberto do painel para traçar o ponto de máxima potência, sendo assim, a tensão se ajusta quando há o desligamento do painel fotovoltaico para calcular  $V_{oc}$ .

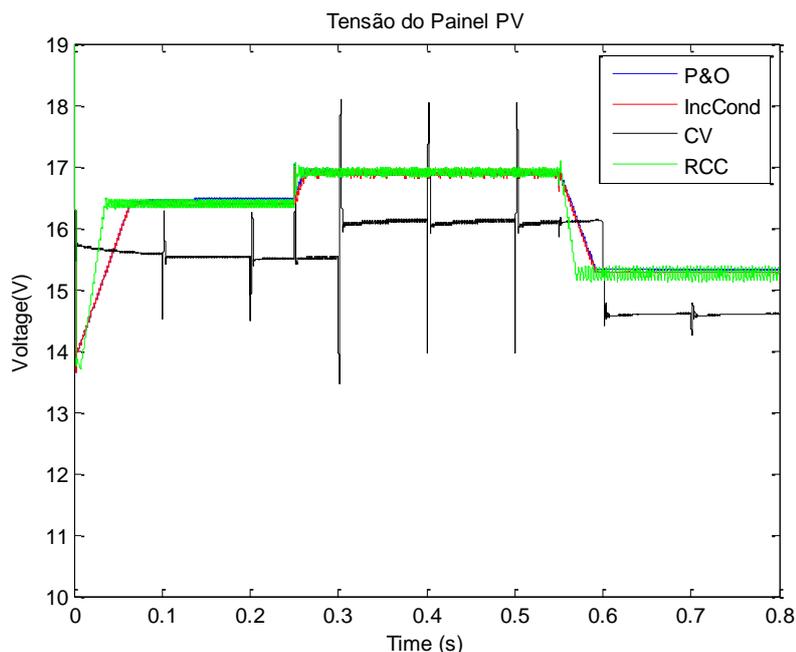


Figura 23 - Tensão de saída do painel PV.

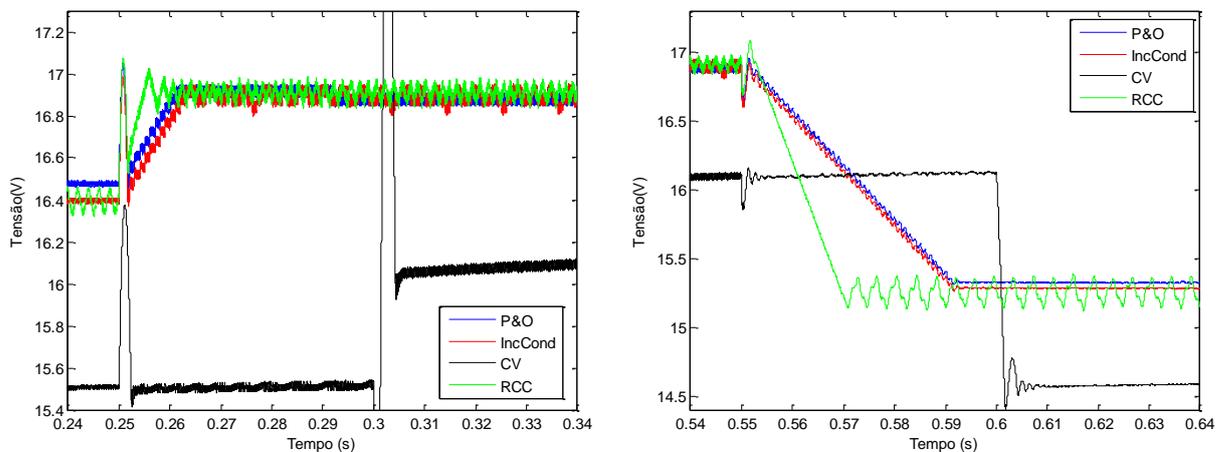


Figura 24 - Tensão de saída do painel PV ampliada nas mudanças de irradiância.

A corrente entregue à bateria pelos quatro métodos é mostrada nas Figura 25 e Figura 26, pode-se perceber que apresentam valores bem próximos. Sendo que ocorrem algumas variações na forma de onda, principalmente no RCC, quando a irradiância é baixa ( $200 \text{ W/m}^2$ ).

A Figura 27 mostra o estado de carga da bateria (SOC), a bateria começou com 20 % de sua carga total, e no tempo em que ocorre a simulação pode ser notado que a bateria está sendo carregada, mas como o tempo de simulação é curto, o estado de carga não aumenta significativamente, necessitando-se de algumas horas para se chegar à carga total.

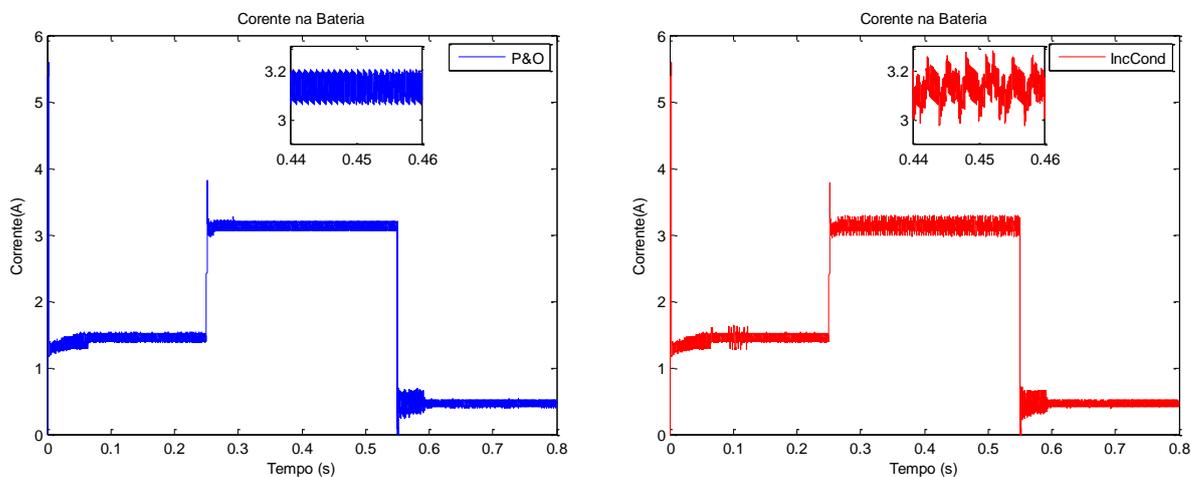


Figura 25 - Corrente da bateria para os algoritmos P&O e IncCond.

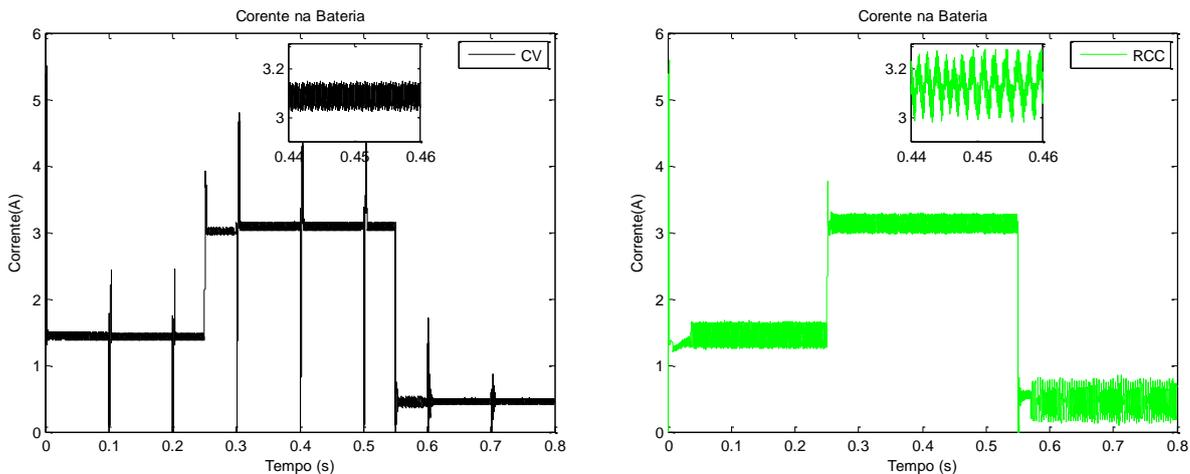


Figura 26 - Corrente na bateria para os algoritmos CV e RCC.

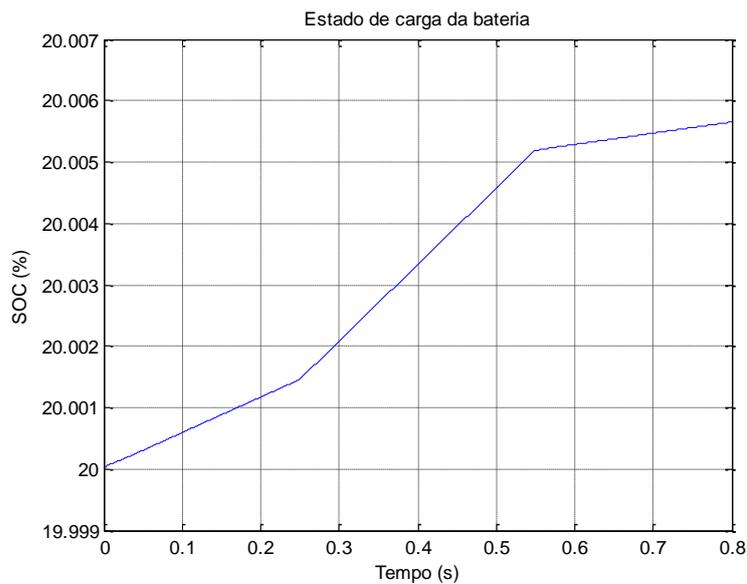


Figura 27 - Estado de carga (SOC) da bateria.

### 4.2 Análise do Compensador PI

Nessa seção é feita uma análise do uso do PI no sistema carregador de bateria. Para isso, fez-se uma comparação do carregador com o compensador PI e outro se calculando diretamente o *duty*, usando o valor de tensão referência e a tensão da bateria. O método RCC foi escolhido para ser usado nesse teste.

A Figura 28 mostra a comparação da tensão extraída do painel PV, observa-se que sem o uso do PI ocorre uma variação de até 2,6 Volts. O mesmo pode ser visto na Figura 29,

sem o PI, ocorre uma variação muito grande por volta de 66%. Por último, tem-se a potência extraída do painel apresentada na Figura 30. Além da potência sem PI estar mais baixa, pode-se observar um *ripple*.

Portanto, percebe-se que o compensador PI é de extrema importância no sistema, pois evita variação brusca do *duty*, reduzindo o estresse sofrido pelo conversor.

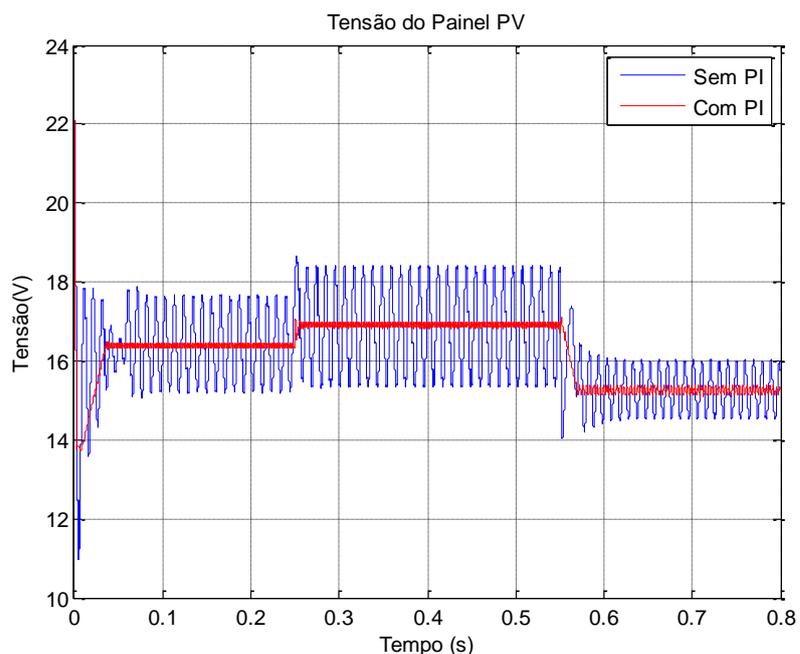


Figura 28 - Comparação da tensão do painel PV com e sem compensador PI.

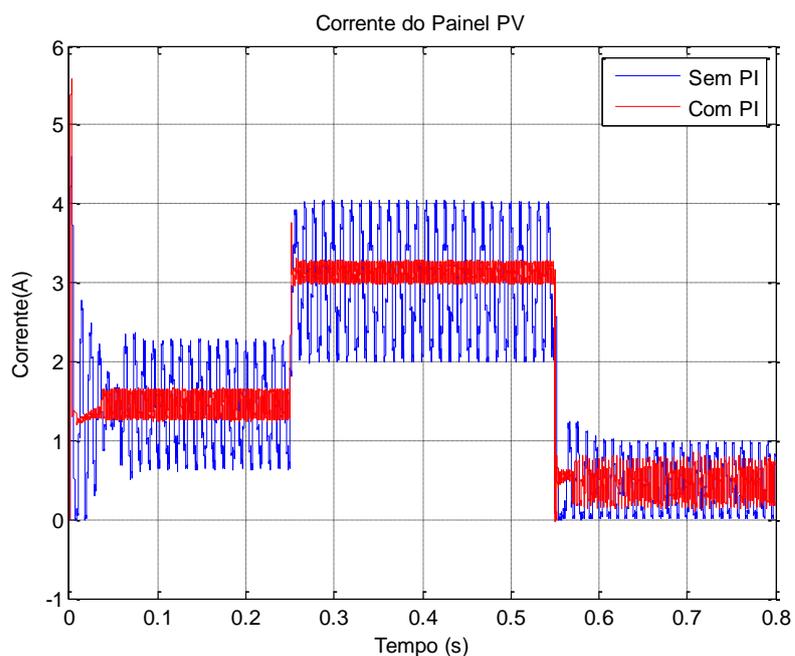


Figura 29 - Comparação da corrente do painel PV com e sem compensador PI.

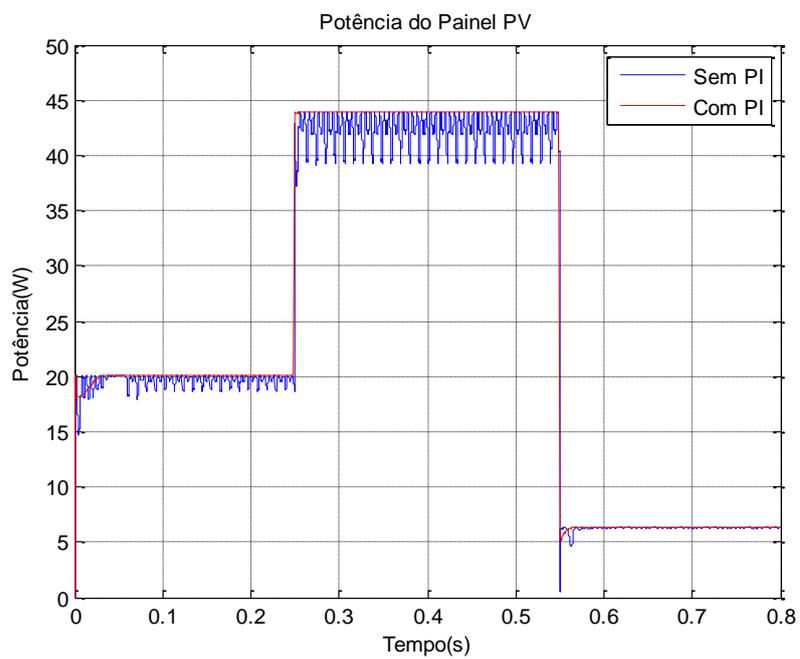


Figura 30 - Comparação da potência do painel PV com e sem compensador PI.

## 5 *Conclusão*

Nesta monografia foi apresentado um projeto de um carregador de baterias usando um sistema fotovoltaico autônomo e de baixa potência. Constando os detalhes dos componentes do sistema.

Embora tenha se simulado pouco tempo, pois, para se carregar totalmente uma bateria demandaria um esforço computacional muito grande, os resultados mostram que o sistema utilizado como carregador de bateria foi realmente capaz de aumentar a carga da bateria.

Como a eficiência de painéis fotovoltaicos ainda são relativamente baixos, buscou-se aumentar a eficiência total do sistema. Para isso foram comparados alguns algoritmos de máxima potência e fez-se uso de um compensador PI.

Os resultados mostram que os algoritmos utilizados para buscar o ponto de máxima potência serviram para traçar o máximo de potência para os métodos Perturba e Observa, Condutância Incremental e Correlação de Ripple; além de o Tensão Constante chegar próximo aos outros. Além disso, os resultados também mostram que sem o uso de um compensador PI há um *ripple* que não é desejado, tornando-o parte importante para manter o sistema mais robusto.

Vale ressaltar que em relação aos algoritmos de MPPT cada um apresenta algumas peculiaridades, o de Tensão Constante pode ser o menos eficiente, no entanto ele faz uso de apenas um sensor de tensão enquanto os outros precisam também de um sensor de corrente. Embora o algoritmo Correlação de Ripple mostrou-se um pouco mais rápido ele requer uso de filtros e pode apresentar problemas para implementação. Os algoritmos de Perturba e Observa e Condutância Incremental foram semelhantes em tudo, além de que se fossem implementados poderia ser feito usando um microcontrolador para calcular a referência e ser o PWM do conversor *buck*.

## ***Referências Bibliográficas***

1. SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia usando Técnica MPPT e Controle Digital**. UFMG. Belo Horizonte. 2009.
2. GAËTAN MASSON, MARIE LATOUR, MANOËL REKINGER. [www.epia.org](http://www.epia.org). **Epia**, 2012. Acesso em: 2013.
3. ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. [S.l.]: [s.n.], 2012.
4. VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio Século de História Fotovoltaica. **Gazeta de Física**, Lisboa, p. 10-14, 2006.
5. VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico conectado à rede**. UNICAMP. Campinas. 2010. (Tese de Doutorado).
6. SILVEIRA, B. M. **Designing and Assembling of a Buck Converter**. UFV. Viçosa. 2012.
7. GTES- GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaicos**. PRC-PRODEEM. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.
8. SOLENBERG ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA. A bateria estacionaria em geradores fotovoltaicos autonomos. [www.solenerg.com.br](http://www.solenerg.com.br). Acesso em: Dezembro 2013.
9. CAVALCANTI, M. C. et al. Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. **Eletrônica de Potência**, p. 163-171, 2007.
10. ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, p. 439-449, 2007.
11. BEKKER, B.; BEUKES, H. J. Finding an optimal pv panel maximum power point tracking method. **7th AFRICON Conference in Africa**, p. 1125-1129, 2004.
12. IMHOFF, J. et al. A stand-alone photovoltaic system based on dc-dc converters in a multi string configuration. **Proc. European Conference on PowerElectronics and Applications**, p. 1-10, 2007.
13. SPIAZZI, G.; BUSO, S.; MATTAVELLI, P. Analysis of mppt algorithms for photovoltaic panels based on ripple correlation techniques in presence of parasitic components. **Brazilian Power Electronics Conference - COBEP**, p. 88-95, 2009.
14. KIMBALL, J. W.; KREIN, P. T. Discrete-time ripple correlation control for maximum power point tracking. **IEEE Transactions on Power Electronics**, p. 2353-2362, 2008.
15. VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. **Analysis and simulation of the P&O MPPT algorithm using a linearized photovoltaic array model**. 10th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP. : . 2009. p. .
16. 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. **IEEE/IAS International Conference on Industrial Applications - INDUSCON**, Fortaleza, November 2012.
17. ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC', D. **Fundamentals of Power Eletronics**. New York: Klumer Academic Publishers, 2004.