



**Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**INSVESTIGAÇÃO DE ALGORITMOS DE
RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA
EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**Autor: Natasha Ficheira Wiechers Lima
Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva**

**Brasília, DF
2014**



NATASHA FICHEIRA WIECHERS LIMA

**INVESTIGAÇÃO DE ALGORITMOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE
MÁXIMA POTÊNCIA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva

Brasília, DF

2014

Ficheira Wiechers Lima, Natasha.

Investigação de Algoritmos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Módulos Fotovoltaicos/ Natasha Ficheira Wiechers Lima. Brasília, 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Orientação: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva.

1. Energia Fotovoltaica 2. Eficiência 3. Algoritmos MPPT I. Silva, Flávio H. J. R. II. Investigação de Algoritmos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Módulos Fotovoltaicos.



INVESTIGAÇÃO DE ALGORITMOS DE RATREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Natasha Ficheira Wiechers Lima

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Flávio H. J. R. Silva, UnB/ FGA

Orientador

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA

Membro Convidado

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA

Membro Convidado

Brasília, DF
2014

AGRADECIMENTOS

Tive a sorte de sempre ter ao meu lado as melhores pessoas que a vida poderia me dar. Agradeço à todos que de forma direta ou indireta contribuíram para o vencimento de mais uma etapa. À minha família sempre presente, aos meus amigos antigos, aos novos amigos, àqueles que já foram muito próximos e hoje são lembranças e principalmente à vida, por sempre me agraciar com portas abertas a cada passo.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Flávio H. J. Silva pelo apoio dado nesse momento importante.

“Deus sabe que nunca devemos nos envergonhar das nossas lágrimas, pois elas são a chuva que dispersa a poeira ofuscante da terra, que recobre nossos corações empedernidos”

(Grandes Esperanças – Charles Dickens)

RESUMO

O presente trabalho tem como tema o rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos. Com o crescimento acentuado da indústria fotovoltaica, muito se tem pesquisado a respeito da eficiência da conversão de energia e uma das formas de tornar o módulo mais produtivo é controlá-lo de forma que este opere sempre próximo ao seu ponto de máxima potência. Visto isso, uma série de técnicas são aplicadas por meio de algoritmos que controlam a operação do painel. O objetivo desse trabalho é descrever algumas das técnicas utilizadas e implementá-las de forma que seja possível compará-las quanto à eficiência do método adotado. Primeiramente, buscou-se caracterizar o comportamento de um módulo fotovoltaico levando em consideração o modelo equivalente de 1 diodo. Para tanto as equações que regem esse sistema foram desenvolvidas e a análise consistiu em observar o comportamento das curvas $I - V$ e $P - V$ com diferentes irradiações, temperaturas, valores de resistência série, paralelo e para diferentes fatores de idealidade do diodo. Os resultados foram bastante positivos e compatíveis com a literatura. Foi possível notar que quanto maior a irradiação, a potência máxima é maior enquanto que o mesmo ocorre quando a temperatura da célula é reduzida. Também observou-se que para maiores valores de resistência série, menor é a potência extraída do sistema e para maiores valores de resistência paralelo, maior é a potência extraída do sistema. Por último foi possível observar que o fator de idealidade do diodo está relacionado à taxa de decaimento da corrente nas proximidades da tensão de circuito aberto. A próxima etapa terá como objetivo implementar as técnicas de rastreamento discutidas tanto em rotinas no Matlab quanto com diagrama de blocos no ambiente de simulação Simulink.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, Máxima Potência, *MPPT* – *Maximum Power Point Tracking*.

ABSTRACT

This work has as theme the maximum power point tracking in photovoltaic panels. The photovoltaic industry keeps growing and a lot of research have been made in the way of improving the energy conversion efficiency. One way to do that is to track the maximum power point and make the panel to work around this point. A lot of techniques are applied through algorithms that controls the PV module operation. The goal of this work is to describe some of these techniques and implement them in order to compare their efficiency. To achieve that, at first, the PV module characterization was made through the 1 diode model equivalent and some of the constants as the irradiance, temperature, series and parallel resistance and the ideal diode factor, were modified and the result was observed in the $I - V$ and $P - V$ curves of the system. The results were good and in accordance to the literature. It was possible to see that as the irradiance is increased, so does the power, while for high temperatures, the PV module gives less power to the load. For different series resistance values, as high as this component gets, less power the module produces while for higher values of parallel resistance, higher is the power. It was possible to see that the ideal diode factor contributes to the rate of the decreasing current when the voltage is close to the Open Circuit voltage value. The next step of this work is to implement the MPPT algorithms in Matlab scripts and also in the Simulink environment with block diagrams.

Keywords: Photovoltaic energy, Maximum power, MPPT – Maximum Power Point Tracking.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Crescimento da capacidade instalada mundial de energia solar fotovoltaica. (Fonte: [6])	20
Figura 2 - Estrutura da célula fotovoltaica. (Adaptado de [1]).....	22
Figura 3 – Módulo fotovoltaico. (Fonte: [1])	23
Figura 4 - Irradiação solar anual na região do Distrito Federal. (Fonte: [11])	25
Figura 5 - Curva I - V típica.	25
Figura 6 - Curva P - V típica.	25
Figura 7 - Curva I - V para diferentes níveis de irradiação.	26
Figura 8 - Curva P - V para diferentes níveis de irradiação.	26
Figura 9 - Curva I - V para diferentes temperaturas.....	27
Figura 10 - Curva P - V para diferentes temperaturas.....	27
Figura 11 - Configuração do sistema fotovoltaico autônomo conectado em série. (Fonte: [16]) .	29
Figura 12 - Configuração do sistema fotovoltaico autônomo conectado em paralelo. (Fonte: [16])	30
Figura 13 - Configuração do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. (Fonte: [18])	34
Figura 14 - Diagrama de fluxo do método da voltagem em circuito aberto. (Fonte: [14], [19]) ..	39
Figura 15 - Comportamento do método P&O na curva P-V.....	41
Figura 16 - Fluxograma do comportamento do algoritmo do método P&O.	42
Figura 17 - Fluxograma do método IncCond.	44
Figura 18 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	45
Figura 19 – Influência da irradiação na Curva I – V.....	49
Figura 20 – Influência da irradiação na Curva P – V.....	50
Figura 21 – Influência da temperatura na Curva I – V.....	51
Figura 22 – Influência da temperatura na Curva P – V.....	52
Figura 23 – Influência da resistência série na Curva P – V.....	53
Figura 24 - Influência da resistência paralelo na Curva P – V.....	54
Figura 25 - Influência do fator de idealidade na Curva I – V.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking de investimentos e produção de energia solar fotovoltaica. (Fonte: [6]).....	20
Tabela 2 - Comparação da eficiência de diferentes materiais de fabricação de células fotovoltaicas. (Fonte: [1]).....	24
Tabela 3 - Relações possíveis de dP/dV	43
Tabela 4 – Dados para a obtenção da energia do band-gap do silício (Si) e do arsenieto de gálio (GaAs). (Fonte: [23]).....	46
Tabela 5 - Constantes utilizadas na modelagem matemática.	47
Tabela 6 – Dados da máxima potência para diferentes irradiações.....	50
Tabela 7 - Dados da máxima potência para diferentes temperaturas.	52
Tabela 8 - Dados da máxima potência para diferentes valores de resistência em série.	53
Tabela 9 - Dados da máxima potência para diferentes valores de resistência em paralelo.....	54
Tabela 10 – Dados da máxima potência para diferentes valores do fator de idealidade do diodo.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
AGM	<i>Absorbed Glass Mat</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIGS	Cobre - Índio - Gálio - Selênio
CIS	Cobre - Índio - Selênio
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
FF	Fator de forma
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IncCond	Condutância Incremental
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NiMH	Níquel-metal-hidreto
P&O	Perturba e Observa
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
REN 21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente
V	Tensão
P	Potência
P_M	Potência máxima
V_{OC}	Tensão de Circuito Aberto
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
V_{MP}	Tensão de máxima potência
I_{MP}	Corrente de máxima potência
η	Eficiência do módulo fotovoltaico
A_P	Área do módulo
η_{MPPT}	Eficiência do método de rastreamento do ponto de máxima potência
P_{FV}	Potência extraída do módulo com o método de rastreamento
k_1	Constante de proporcionalidade
k_2	Constante de proporcionalidade
ΔV	Varição da tensão entre dois pontos
ΔP	Varição da potência entre dois pontos
V_{PV}	Tensão de saída da célula ou módulo fotovoltaico
I_{pv}	Foto-corrente
R_p	Resistência em Paralelo
R_s	Resistência em Série
I_r	Corrente de Saturação Reversa
n	fator de idealidade do diodo
q	carga do elétron
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura da célula ou módulo fotovoltaico
I_{rr}	Corrente de Saturação Reversa na Temperatura de referência
T_r	Temperatura de referência
E_G	energia do <i>band-gap</i> do material da célula
α_T	coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito
S	Irradiação
a	Constante na determinação de EG
b	Constante na determinação de EG
V_T	Constante simplificadora da equação da corrente para células associadas em série
N_s	Quantidade de células em série que compõe o módulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.2.1. Objetivo Geral.....	15
1.2.2. Objetivo Específico.....	15
1.3. METODOLOGIA SIMPLIFICADA	16
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	17
2.1. HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
2.2. O MERCADO MUNDIAL DO SETOR FOTOVOLTAICO.....	19
2.2.1. O Mercado Brasileiro do Setor Fotovoltaico	21
2.3. FUNCIONAMENTO	22
2.4. DESCRIÇÃO DE SISTEMAS ISOLADOS.....	29
2.5. DESCRIÇÃO DE SISTEMAS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA	34
3. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – ALGORITMOS	
<i>MPPT</i> 37	
3.1. ALGORITMOS DE CONTROLE INDIRETO	38
3.1.1. Método da Tensão Constante.....	38
3.1.2. Método da Corrente Constante	39
3.2. ALGORITMOS DE CONTROLE DIRETO	40
3.2.1. Método Perturba e Observa (P&O).....	40
3.2.2. Método da Condutância Incremental (IncCond).....	42
4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	45
5. RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO	49

5.1. INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO NO DESEMPENHO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO	49
5.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO	51
5.3. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA SÉRIE E PARALELO E DO FATOR DE IDEALIDADE DO DIODO	52
6. CONCLUSÕES PARCIAIS	56
7. PRÓXIMAS ETAPAS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica vem crescendo a passos largos e a exploração de novas fontes e recursos deve acompanhar esse crescimento. Em contra partida, a atenção dada às atividades sustentáveis é enorme, portanto a busca por fontes renováveis de energia vem impulsionando pesquisadores e indústria com o objetivo de alcançar a melhor eficiência.

O conceito de fonte renovável de energia vem sido discutido e pode ser entendido como uma fonte de energia que se renova em tempo hábil para ser reutilizada, o que a torna inesgotável do ponto de vista do consumo [1]. A exemplo disto, tem-se a energia hidráulica, dos ventos, do sol, biomassa, oceânica e geotérmica. Combustíveis fósseis são ditos não renováveis pois o tempo de renovação deste, quando comparado ao tempo de consumo é muito maior. Em conjunto ao conceito de fontes renováveis de energia, é importante destacar a energia limpa. Todas as fontes de energia trarão impactos negativos ao meio ambiente e este conceito se associa àquelas que produzam menor efeito colateral, seja social ou ambiental [1]. Uma fonte não renovável de energia pode ser considerada limpa, como destaca Villalva (2012) para o caso de usinas term nucleares, que são essencialmente não renováveis porém a poluição associada a esse tipo de geração é mínima, dando-lhe o caráter de energia limpa.

Em relação ao consumo de energia no mundo, segundo Villalva (2012), em 1980 este valor era de 7.000 TWh. Previsões da IEA (*International Energy Agency*) indicam que no ano de 2030 a demanda mundial será de 30.000 TWh. Ainda segundo esta agência, 80% da energia elétrica gerada é proveniente de fontes não renováveis. A previsão de crescimento de energias renováveis é bem positiva. Até 2010, a produção de energia eólica e solar juntas somavam aproximadamente 240 GW. Estima-se que em 2100 a fonte de energia solar fotovoltaica será a principal fonte de energia mundial [1].

Atualmente, a energia proveniente do sol é dividida em duas formas principais de utilização, a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica [1]. A primeira é empregada tanto para aquecimento quanto para produção de energia. Para ambos os casos, usam-se coletores que captam o calor do sol e o transfere para o fluido de interesse. Em usinas solares térmicas, esse calor funciona como a fonte quente de uma máquina térmica. A energia solar fotovoltaica parte do princípio do efeito fotovoltaico para converter diretamente luz solar em energia elétrica e será o objeto de estudo desse trabalho.

No Brasil, apesar de a matriz elétrica nacional ser das mais renováveis do mundo, contando com 84,5% de participação de fontes renováveis em 2012 contra 19,7% em 2010 em termos mundiais [2], a energia solar fotovoltaica ainda é muito pouco utilizada, não sendo contabilizada individualmente no Balanço Energético Nacional. Segundo Villalva (2012), o Brasil tem capacidade de produzir 200 GW de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica, porém faltam incentivos do governo nesse setor.

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Com o crescente investimento em fontes renováveis de energia, há também a necessidade de se investir em pesquisas que visem maximizar a eficiência na conversão. Atualmente, painéis fotovoltaicos apresentam baixa eficiência, justificada por diversos fatores que serão descritos em tópicos futuros. Alguns controladores de carga operam com o objetivo de extrair a máxima potência de sistemas fotovoltaicos e diversos algoritmos são usados no sentido de detectar o melhor ponto de operação do painel ([3]), contribuindo para o aumento da eficiência do painel.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Estudar o funcionamento de células e módulos fotovoltaicos, analisando os parâmetros que influenciam na conversão de luz solar em energia elétrica e identificando meios de extrair a máxima potência para uma dada situação.

1.2.2. Objetivo Específico

Modelar o sistema fotovoltaico, avaliar suas curvas de corrente em função da tensão e a relação de ambas com a irradiação, temperatura e constantes que influenciam no modelo. Definir os pontos de máxima potência. Estudar algoritmos de controle *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*), comparando-os no sentido de concluir a respeito da melhor potência aproveitada e melhor eficiência.

1.3. METODOLOGIA SIMPLIFICADA

O comportamento do painel foi modelado matematicamente e a visualização da influência de parâmetros como temperatura, irradiação e algumas constantes foi promovida através de rotinas no *software* MatLab/Simulink e Excel. Os resultados obtidos foram comparados aos dados presentes na literatura de sistemas fotovoltaicos.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo dois contém uma descrição de sistemas fotovoltaicos, com informações a respeito do histórico de surgimento e desenvolvimento da tecnologia, o funcionamento de painéis, aspectos econômicos que envolvem o crescimento do setor tanto em escala nacional quanto global e informações relativas à aplicação desses sistemas de modo isolado ou conectados à rede. O Capítulo três introduz o conceito de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, definido quatro métodos empregados. O Capítulo quatro traz a modelagem matemática do sistema físico de conversão fotovoltaica, apresentando as equações para o modelo equivalente de um diodo. O Capítulo cinco apresenta os resultados obtidos após a análise do sistema submetido a diferentes condições de irradiação, temperatura, valores de resistência série e paralelo e o fator de idealidade do diodo. Também contém uma discussão a respeito das informações obtidas. Os Capítulos seis e sete tem as conclusões parciais e direções a serem seguidas na etapa seguinte do trabalho.

2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sistemas de energia solar fotovoltaica tem como princípio fundamental o efeito fotovoltaico. Basicamente, a radiação solar, composta por ondas eletromagnéticas do espectro visível e não visível transportam energia, que pode ser convertida em calor ou energia elétrica [1]. Assim, são caracterizados três fenômenos principais envolvendo esse tipo de radiação. A transferência de calor se dá quando as ondas eletromagnéticas atingem um corpo capaz de absorver aquela dada energia, causando o conseqüente aumento na sua energia térmica [1]. Há situações em que a incidência da radiação produz alterações nas propriedades elétricas dos materiais e os principais fenômenos nesse sentido são os efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico.

No efeito fotoelétrico, a incidência da luz ou onda eletromagnética com energia suficientemente elevada resulta na emissão de elétrons. Esse efeito é mais comum em materiais metálicos, porém pode ocorrer também em materiais não metálicos sólidos, líquidos ou gasosos. Nem sempre, essa remoção de elétrons é capaz de criar uma tensão elétrica sobre o material [1].

No efeito fotovoltaico, que será detalhado futuramente, o que se observa é que a radiação eletromagnética, quando em contato com um material semicondutor, gera uma diferença de potencial entre este material, com excesso de elétrons e um segundo, também semicondutor, com falta de carga negativa [1].

Um fator que influencia diretamente no efeito fotovoltaico e conseqüentemente na geração de energia é a radiação, que varia de acordo com cada localidade e sofre influência das massas de ar, nuvens e poluição [1]. A contabilização da radiação recebida por um sistema fotovoltaico é chamada de radiação global, que corresponde à soma das radiações direta e difusa. A radiação direta, como o próprio nome já diz, é aquela que vem diretamente do sol e incide em linha reta no objeto em questão, enquanto a radiação difusa é proveniente de reflexos e difração na atmosfera e atingem o objeto indiretamente [1].

2.1. HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A primeira célula solar moderna foi apresentada à comunidade no ano de 1954, porém antes disso, anos de pesquisa e desenvolvimento foram necessários. O primeiro relato que se tem a respeito do efeito fotovoltaico data de 1839 pelo cientista Edmond Becquerel. Em seu experimento, notou que placas metálicas imersas em solução química apresentavam uma diferença de potencial quando expostas à luz ([1], [4]). Ainda no século XIX, experimentos com selênio foram

desenvolvidos e foi criado o primeiro dispositivo sólido capaz de produzir eletricidade quando exposto à luz e, ainda que com baixíssima eficiência, 0,5%, essas células foram comercializadas para máquinas fotográficas ([1], [4]). Os avanços relativos à essa tecnologia foram poucos neste século, porém ganharam um novo impulso quando, no início do século XX, o cientista Albert Einstein foi capaz de explicar o efeito fotoelétrico ([1], [4]). Vallêra *et al.* (2006) destaca ainda que sem o advento da mecânica quântica, teoria de bandas e física de semicondutores, técnicas de purificação e dopagem relacionadas ao transistor de silício, a energia elétrica solar não existiria.

A primeira célula solar de silício foi produzida em 1953 na empresa *Bell Laboratories* [4]. O processo teve início com a dopagem de uma barra de silício com gálio, tornando o condutor com cargas móveis positivas (tipo p). A mesma barra foi mergulhada em um banho quente de lítio, apresentando após esse processo um acúmulo de cargas negativas na superfície (tipo n). Foi notado um campo elétrico permanente na junção p-n e a produção de corrente quando a amostra era exposta à luz. Na época já haviam estudos com células solares de selênio, que apresentavam eficiência de conversão de 1% [4]. A nova tecnologia com base no silício tinha eficiência de 4% [4].

Muitas pesquisas foram desenvolvidas após a descoberta de 1953 e a eficiência da célula chegou a atingir 6% na época. Segundo [4], a primeira aplicação das células solares de silício foi na cidade de *Americus*, no estado da Geórgia. Um painel com nove células de 30 mm de diâmetro ficou cinco meses em operação nos anos de 1955 e 1956 e apresentou resultados promissores [4].

O elevado custo de fabricação impediu que a tecnologia tivesse um alcance global e, inicialmente, o mercado aeroespacial foi o primeiro consumidor das células solares de silício [4]. Em 1958 foi lançado, pela NASA, o primeiro satélite com tecnologia de conversão de energia solar em elétrica e, no mesmo ano com a diferença de dois meses, a União Soviética também fez uso de células solares em seus satélites. Isto virou uma tendência e atualmente todos os veículos espaciais são equipados com células solares [4]. Nessa época, o desenvolvimento da tecnologia de conversão de energia solar em elétrica foi acelerado.

Além do mercado aeroespacial, células fotovoltaicas começaram a ser interessantes na área de telecomunicações remotas [4]. Com a crise do petróleo em 1973 os sistemas fotovoltaicos começaram a ser vistos como uma alternativa real na geração de energia e os esforços se concentraram na redução do preço dessa energia. Os resultados foram positivos e em menos de

uma década o valor da energia solar caiu de USD 80/Wp para USD 12/Wp [4]. Em relação à eficiência, na mesma época, esta alcançou os 25% em células com concentrador [4].

Segundo Vallêra *et al.* (2006), as décadas seguintes são caracterizadas por aumento nos investimentos e incentivos ao setor. Em 1982 foi instalada a primeira central solar, com capacidade de 1 MW na Califórnia. Em 1999 a capacidade instalada de painéis solares era de 1 GW, dobrando num período de três anos. Em 1998 foi atingida a eficiência de 24,7% em células com silício monocristalino, superior a 20% com silício multicristalino e 34% em células em cascata [4].

As previsões futuras são das mais otimistas. Vallêra *et al.* (2006) destaca em seu artigo que a *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)* prevê que o crescimento do mercado seja superior a 30%, que em 2020, 1% da eletricidade mundial será proveniente do sol e em 2040, 26%.

No Brasil, a indústria fotovoltaica teve início com a instalação da empresa Heliodinâmica nos anos 80, que atuava na produção de lingotes de silício monocristalino, células e módulos fotovoltaicos para aplicação em sistemas isolados [5]. A instalação de módulos, segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABIEE), teve início em 1994 com o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) para o suprimento de 7.000 consumidores e capacidade de geração de 5 MWp.

2.2. O MERCADO MUNDIAL DO SETOR FOTOVOLTAICO

É importante situar o contexto em que este e tantos outros trabalhos com foco na energia solar fotovoltaica se insere atualmente. A visão mundial a respeito da energia vem mudando e existe uma demanda crescente por fontes renováveis de energia. Nesse sentido o investimento em pesquisas de forma a tornas essas fontes mais eficientes e seguras é crescente e necessário uma vez que se pretende continuar ampliando o alcance desse novo setor.

De acordo com o relatório *Renewables 2014* elaborado pelo *REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century)* no ano de 2004, o investimento mundial em fontes renováveis foi de USD 39,5 bilhões, passando para USD 249,5 bilhões em 2012. Os países que lideram o *ranking* de investimentos são China, Estados Unidos, Japão, Reino Unido e Alemanha [6]. Em relação a investimentos, capacidade instalada de energia solar fotovoltaica e capacidade *per capita*, a Tab. (1) traz o *ranking* dos cinco países que lideram o setor.

Tabela 1 - Ranking de investimentos e produção de energia solar fotovoltaica. (Fonte: [6])

	Investimentos	Capacidade instalada	Capacidade instalada <i>per capita</i>
1°	China	Alemanha	Alemanha
2°	Japão	China	Itália
3°	Estados Unidos	Itália	Bélgica
4°	Alemanha	Japão	Grécia
5°	Reino Unido	Estados Unidos	República Tcheca

O crescimento da capacidade mundial instalada de painéis fotovoltaicos no ano de 2013 foi de 39 GW, e esse acréscimo fez com que a produção mundial se aproximasse de 139 GW no mesmo ano, sendo um terço dessa produção localizada na China [6]. O gráfico da Fig. (1) mostra o crescimento na capacidade instalada mundial.

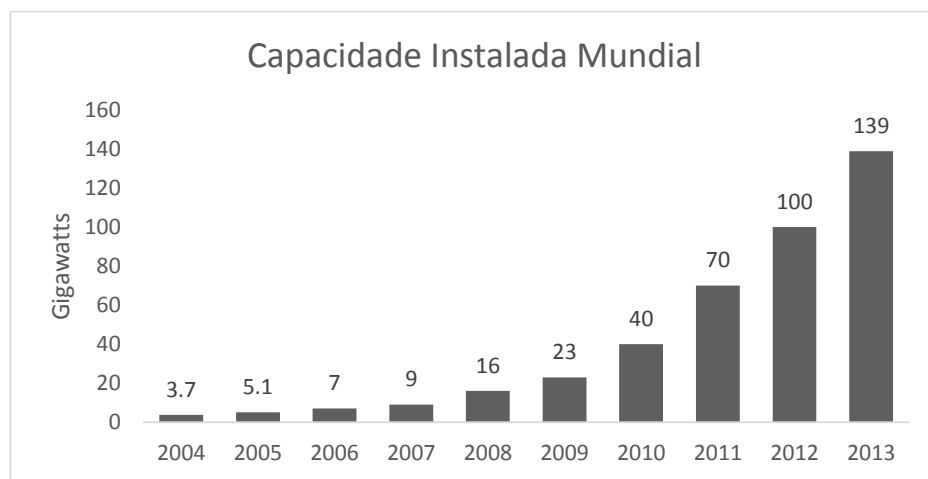


Figura 1 - Crescimento da capacidade instalada mundial de energia solar fotovoltaica. (Fonte: [6])

Segundo *REN 21*, a energia solar fotovoltaica vem ocupando posição importante na geração de energia elétrica especialmente na Europa e começa a estabelecer novos mercados, com boas expectativas de crescimento, em países da África, Ásia e América Latina. O preço dos módulos tem se mantido constante enquanto que o custo de produção decresce e a eficiência aumenta, portanto as previsões do mercado são bastantes positivas [6].

Ao final de 2013, nove países adicionaram mais de 1 GW de energia solar fotovoltaica à sua rede de distribuição, 5 países tinham pelo menos 10 GW de capacidade instalada contra dois no ano anterior e 17 países tinham pelo menos 1 GW de capacidade instalada. Na América Latina e Caribe, alguns projetos estão em desenvolvimento. Os mercados brasileiro e chileno crescem vagarosamente, enquanto o México se destaca como líder regional do setor [6]. Em termos de contribuição no suprimento de eletricidade, a capacidade instalada da Itália consegue suprir 7,8% de sua demanda por eletricidade [6]. Na Grécia esse valor cai para 6% e 5% na Alemanha [6]. De acordo com *REN 21*, a capacidade instalada mundial atualmente em operação tem condição de fornecer 1 TWh de eletricidade por ano.

Em relação à indústria fotovoltaica, o ano de 2013 foi um ano de recuperação [6]. Os preços dos módulos se estabilizaram em respostas à crescente demanda e o custo de produção estava em queda [6]. O que contribuiu para isso foram o baixo preço do material e esforços para manter o preço de processos de fabricação controlados. A China conseguiu alcançar o valor de USD 0,5/Wp [6]. O investimento mundial no ano de 2013 foi menor do que nos anos anteriores, porém a capacidade instalada cresceu, o que indica que o custo de instalação de sistemas fotovoltaicos está em queda [6]. O crescimento da indústria de módulos foi de 20% de 2012 para 2013 e a Ásia é o líder mundial, sendo responsável por 87% da produção mundial de módulos, destes, 67% vem da China.

2.2.1. O Mercado Brasileiro do Setor Fotovoltaico

Atualmente no Brasil, de acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG), 209 Centrais Geradoras Solar Fotovoltaica estão em operação, somando uma potência autorizada de 18.559 kW, correspondendo a 0,01% da potência gerada no país e 1 unidade de 30 MW já foi outorgada, mas não teve construção iniciada ainda.

O Brasil possui um potencial de geração fotovoltaica enorme, com média de insolação variando de 4.500 Wh/m² à 6.000 Wh/m² dependendo da região ([1]), porém, como descrito no tópico anterior, não se destaca no cenário mundial nem com capacidade instalada ou alto nível de investimentos, nem como produtor. Segundo a ABIEE (2012), a oportunidade de exploração da energia solar no país é evidente, não só pela alta incidência de radiação solar, mas também pela redução nos preços do módulo e instalação no geral e aumento da eficiência de conversão.

A ABIEE (2012) destaca em seu relatório que deve haver uma mobilização por parte dos agentes responsáveis com foco em incentivos à demanda e à oferta. No primeiro, é interessante que se continue o processo de criação e aperfeiçoamento de marcos regulatórios que favoreçam a inserção da fonte fotovoltaica e a geração distribuída. No segundo, deve haver incentivo à produção local. No entanto, [5] destaca que o crescimento do setor fotovoltaico no Brasil continuará lento pois o custo da instalação, principalmente para consumidores residenciais, é bastante elevado e, além disso, agentes distribuidores ainda tem uma visão negativa quanto à geração distribuída por acreditarem que este novo modelo pode prejudicar seu mercado cativo.

A Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 estabelece condições para o acesso à microgeração e minigeração distribuída. Esse pode ser o primeiro incentivo ao mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil e pode ser visto como um ponto de partida no sentido de crescimento do setor.

2.3. FUNCIONAMENTO

Como já dito anteriormente, a conversão da energia solar em energia elétrica é possível graças ao efeito fotovoltaico. Partindo desse princípio, uma célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semicondutor, N, com excesso de cargas negativas, e P, com menos elétrons, portanto assumindo um caráter positivo [1]. De acordo com Villalva (2012), ambos os materiais quando em contato formam uma barreira de potencial, porém, na presença de luz, os elétrons da camada N ganham energia suficiente para romper essa barreira. Além das camadas P e N, as células fotovoltaicas também são formadas por uma grade metálica na sua região superior e uma base metálica que funcionam como eletrodos e permitem o movimento de elétrons, em corrente contínua, como pode ser visto na Fig. (2) ([1], [9]).

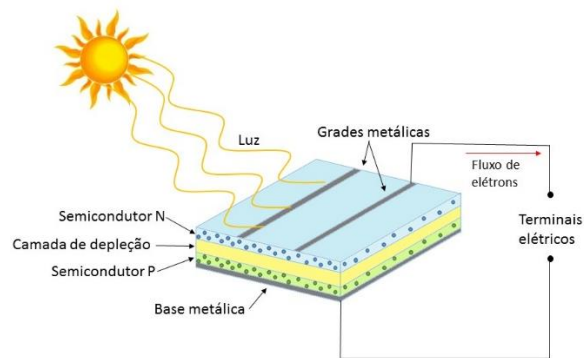


Figura 2 - Estrutura da célula fotovoltaica. (Adaptado de [1])

De acordo com Villalva (2012), módulo, placa ou painel fotovoltaico representam a mesma estrutura física, que é um agrupamento de células fotovoltaicas. O esquema representado na Fig. (2) indica uma única célula, que individualmente produz pouca energia. O módulo é formado por um conjunto de células ligadas em série para produzir maior voltagem ([1], [9]). Segundo Monteiro (2005), a união entre a camada positiva de uma célula com a camada negativa da célula adjacente cria um caminho de deslocamento de elétrons e esse processo vai se repetindo em células consecutivas até que se chegue ao terminal do módulo. Assim, a Fig. (3) traz a representação comum de um módulo fotovoltaico. Os módulos comerciais têm potência variando entre 50 W e 250 W e, de acordo com Villalva (2012), tensão máxima de aproximadamente 37 V. Módulos de filme fino tem potência variando entre 50 W e 100 W e conseguem atingir uma tensão de saída mais elevada, aproximadamente 70 V, no entanto baixa corrente o que dificulta sua empregabilidade [1].

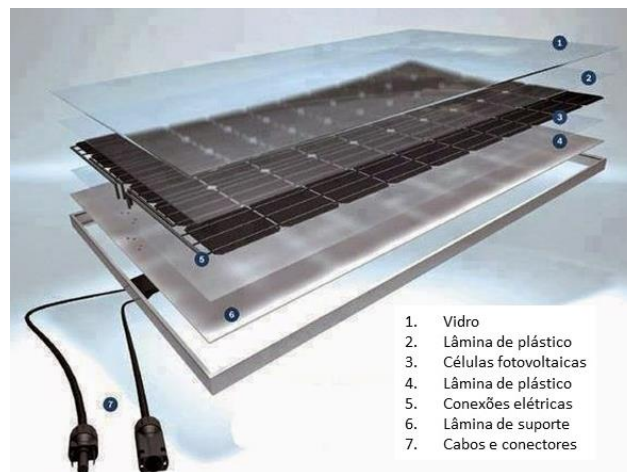


Figura 3 – Módulo fotovoltaico. (Fonte: [1])

O material mais utilizado na confecção de células fotovoltaicas é o silício, podendo ser monocristalino, policristalino, filme fino, amorfo e microcristalino ([1], [9]). Atualmente existem linhas de pesquisa de células orgânicas e poliméricas que tem se mostrado eficiente [10], porém em termos de linha de produção comercial, ainda não são aplicadas em larga escala.

Células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em escala comercial (15% a 18%), porém têm elevado custo quando comparada a outros materiais e precisam ser montadas em módulos para adquirirem resistência mecânica ([1], [9]). Já as células de silício policristalino são menos eficientes (13% a 15%), porém com custo de produção menor [1].

Em seu trabalho, Villalva (2012) faz uma comparação entre os diversos materiais e suas respectivas eficiências, que pode ser vista na Tab. (2).

Tabela 2 - Comparação da eficiência de diferentes materiais de fabricação de células fotovoltaicas. (Fonte: [1])

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício cristalino de filme fino	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício micromorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Dois fatores são de extrema importância no momento de se estimar a produção de energia de um sistema fotovoltaico, a irradiância e a insolação. A primeira, também conhecida por irradiação, é medida em W/m^2 e representa a unidade de potência por área, ou seja, a energia que o sol cede a determinada região, em um intervalo de um dia, um mês ou um ano [1]. O gráfico da irradiância apresenta essa grandeza em função do tempo e a integral da curva indica a energia recebida por unidade de área no tempo determinado. A título informativo, o gráfico da Fig. (4) mostra a variação de irradiação ao longo de um ano na região do Distrito Federal, com média de $4,93 \text{ kWh}/m^2 \cdot \text{dia}$. A insolação é a energia recebida por unidade de área, geralmente representada em Wh/m^2 .

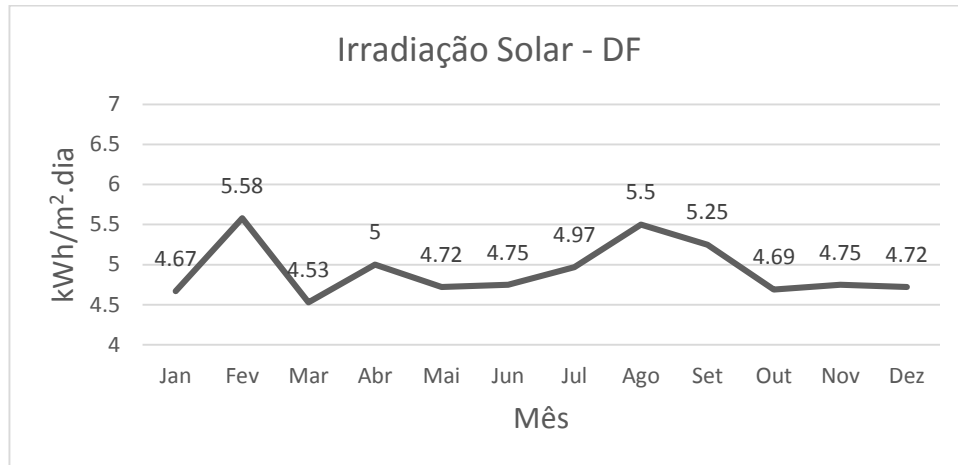


Figura 4 - Irradiação solar anual na região do Distrito Federal. (Fonte: [11])

Uma célula fotovoltaica não se comporta como uma fonte de tensão convencional, pois os valores tanto de tensão quanto de corrente variam de acordo com a irradiância, temperatura e carga conectada [1]. As curvas típicas $I - V$ e $P - V$ de um módulo fotovoltaico são mostradas nas Fig. (5) e Fig. (6) com P_M indicando o ponto de operação de máxima potência.

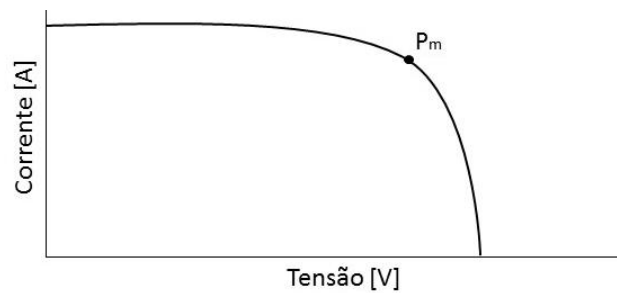


Figura 5 - Curva $I - V$ típica.

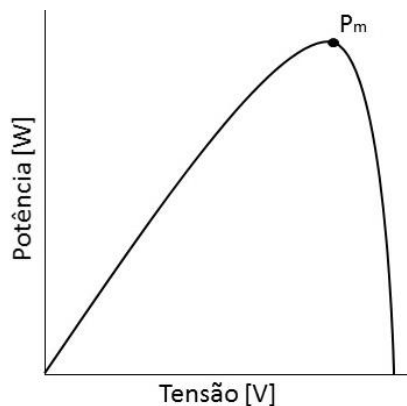


Figura 6 - Curva $P - V$ típica.

A radiação e a temperatura influenciam diretamente no desempenho do módulo. De acordo com alguns autores ([1], [12], [13] e [14]) quanto maior for a radiação, maior será a corrente gerada e conseqüentemente a potência, como pode ser visto nas Fig. (7) e Fig. (8).

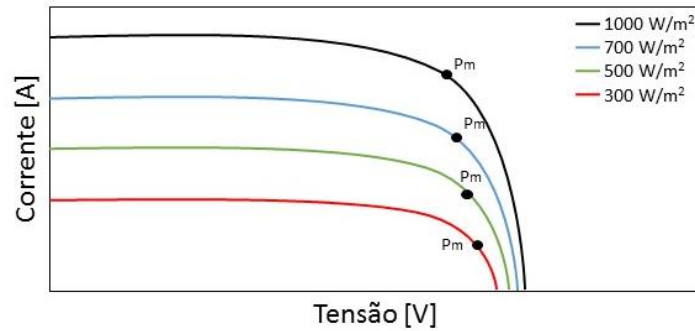


Figura 7 - Curva $I - V$ para diferentes níveis de irradiação.

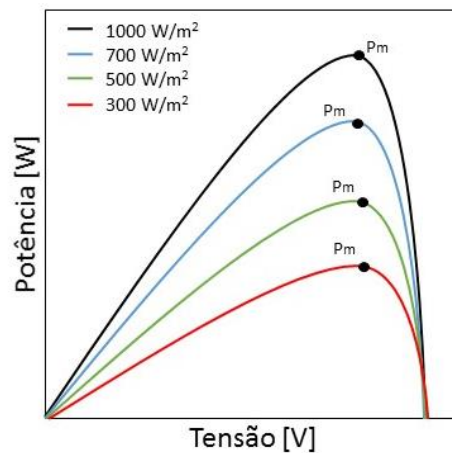


Figura 8 - Curva $P - V$ para diferentes níveis de irradiação.

Já no caso da variação de temperatura, quanto menor for a temperatura ambiente, maior voltagem o sistema fotovoltaico é capaz de entregar e conseqüentemente, maior potência, como pode ser visto nas Fig. (9) e Fig. (10) ([1], [12], [13] e [14]).

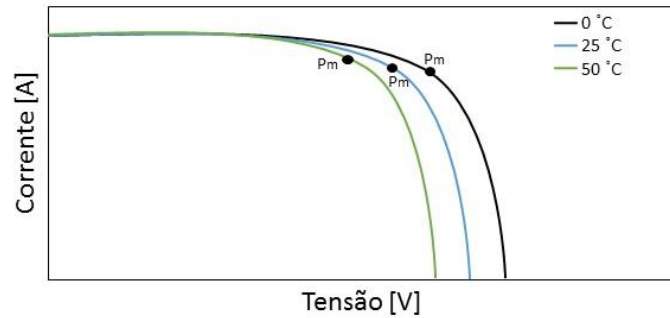


Figura 9 - Curva $I - V$ para diferentes temperaturas.

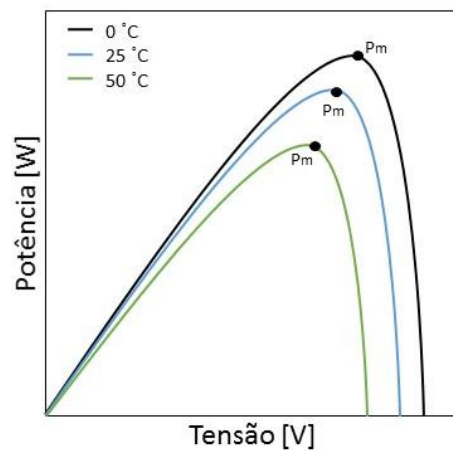


Figura 10 - Curva $P - V$ para diferentes temperaturas.

Para serem comercializados, os módulos devem ser testados sob condições estabelecidas por organismos internacionais, que estabeleceram as *Standard Test Conditions (STC)*. A condição ambiente padrão para testes é de 25 °C de temperatura e irradiação de 1000 W/m² [1]. Alguns parâmetros, que serão descritos a seguir, devem ser avaliados sob essa condição ambiente para que as características de operação do painel sejam estabelecidas [1].

Tensão de circuito aberto (V_{oc})

É a tensão elétrica medida nos terminais do módulo quando este está em circuito aberto [1].
Medida em Volts [V].

Corrente de curto-circuito (I_{sc})

É a corrente medida quando os terminais do módulo estão em curto-circuito [1]. Indica a máxima corrente que o módulo pode fornecer nas condições padrão e é medida em Ampères [A].

Tensão e corrente de máxima potência (V_{MP} e I_{MP})

A tensão e corrente de máxima potência são os valores indicados nas curvas $I-V$ e $P-V$ mostradas anteriormente que resultam na máxima potência entregue pelo módulo [1].

Potência de pico ou máxima potência (P_M)

É a máxima potência que o módulo é capaz de produzir [1]. É consequência do produto entre V_{MP} e I_{MP} .

Fator de Forma (FF)

O fator de forma é a relação entre a máxima potência extraída e o produto entre a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto [16].

Eficiência do módulo

A eficiência do módulo se relaciona à quanto de energia recebida do sol pode ser convertida em energia elétrica. Segundo Villalva (2012), a Eq. (1) é válida para este cálculo, onde A_P é a área do módulo.

$$\eta = \frac{P_M}{A_P \times 1000} \quad (1)$$

Resistência à corrente inversa

A resistência à corrente inversa é um parâmetro importante quando se tem mais de um módulo associado em paralelo. Essa grandeza determina a corrente limite que o módulo é capaz de suportar entrando pelo seu terminal positivo e saindo pelo negativo [1]. Esse fenômeno pode ocorrer quando, conectados em paralelo, um módulo recebe menos luz solar que os demais e passa a ser visto como carga ao invés de fonte. Caso a corrente reversa seja mais elevada que àquela especificada na folha de dados do fabricante, o módulo pode ser danificado [1].

Outra situação interessante destacada por Villalva (2012) ocorre quando se tem um conjunto de módulos associados em série ou paralelo. A associação em série resulta em uma maior tensão de saída, enquanto a associação em paralelo faz com que a corrente de saída seja maior. Associar módulos em série e em paralelo é bastante interessante do ponto de vista de produção de

potência pois tanto a tensão quanto a corrente de saída serão maiores do que caso só um tipo de associação seja adotado [1].

2.4. DESCRIÇÃO DE SISTEMAS ISOLADOS

Sistemas de geração fotovoltaica podem ser autônomos ou conectados à rede de distribuição de energia elétrica, sendo os primeiros caracterizados por apresentarem os módulos fotovoltaicos como única fonte de geração de energia ([1], [15]). Sistemas isolados de geração geralmente são direcionados a regiões que não estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), no caso do Brasil, e devem ser bem dimensionados e, conseqüentemente, confiáveis ([1], [15]).

Um sistema autônomo é composto no geral por um conjunto de módulos fotovoltaicos, controlador de carga, banco de baterias, conversor CC/CC e inversor caso a carga a ser alimentada opere em corrente alternada ([1], [15]). De acordo com Seguel (2009), o sistema pode ter configuração em série ou paralelo, dependendo da forma com que o sistema de armazenamento é posicionado. Na configuração em série, o banco de baterias é colocado em série com a carga e o fluxo de energia é direto, portanto toda energia consumida flui por meio do banco de baterias, o que eventualmente pode vir a prejudicar a vida útil do mesmo [16]. A Figura (11) mostra o diagrama de blocos típico de um sistema fotovoltaico autônomo conectado em série.

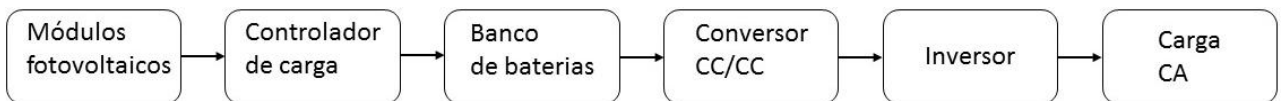


Figura 11 - Configuração do sistema fotovoltaico autônomo conectado em série.
(Fonte: [16])

Já sistemas em que o banco de baterias é conectado em paralelo com a carga, o sistema de armazenamento só é utilizado quando a demanda for superior a produção de energia, o que, segundo Seguel (2009), evita cargas e descargas desnecessárias e contribui para a manutenção da qualidade do banco de baterias. O diagrama mostrado na Fig. (12) indica a disposição de componentes conectados nesse tipo de configuração.

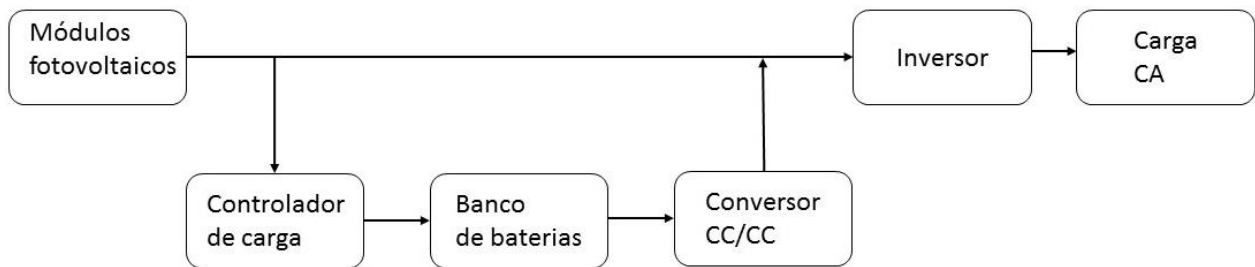


Figura 12 - Configuração do sistema fotovoltaico autônomo conectado em paralelo.
(Fonte: [16])

A escolha do melhor arranjo varia muito conforme a finalidade, porém a funcionalidade e características de cada componente se mantem a mesma e serão brevemente descritas a seguir.

Baterias

Em sistemas fotovoltaicos autônomos, as baterias são essenciais pois irão garantir a confiabilidade do sistema e suprimento da carga em momentos em que não há produção de energia. As baterias geralmente se fazem presentes por meio de bancos de baterias, que são simplesmente um agrupado de baterias capaz de armazenar a quantidade de energia para o qual foi projetado. As baterias comerciais geralmente têm tensão de 12 V, 24 V ou 48 V e podem ser conectadas em série, para obtenção de maiores tensões, ou em paralelo, para a obtenção de maiores correntes ([1], [16]). Para que se tenha o aumento simultâneo de tensão e corrente, Villalva (2012), sugere a associação em série e paralelo do banco de baterias.

Quanto aos tipos de baterias, as mais comuns são as de chumbo-ácido e as de níquel-cádmio [16], porém usa-se também as de NiMH (níquel-metal-hidreto) e as AGM (*absorbed glass mat*) [1]. Por não ser o foco do trabalho, não será feito um detalhamento completo das características de cada tipo de bateria.

A capacidade da bateria é informada em Ampère-hora e determina quanto de unidade de corrente no tempo pode ser retirado de uma bateria plenamente carregada e essa característica, juntamente com o tempo de carga e tensões de carga e flutuação variam conforme o tipo de bateria e fabricante ([1], [16]). Baterias de ciclo profundo são aquelas capazes de sofrer mais ciclos de carga e descarga do que as convencionais [1].

A vida útil da bateria se relaciona à quantidade de ciclos de carga e descarga que a bateria pode realizar e é diretamente influenciada pela sua idade, temperatura e profundidade de descarga ([1], [16]).

Seguel (2009) destaca ainda a importância de dispositivos de desconexão por baixa tensão e bloqueio de corrente reversa. No primeiro deles, o controlador desconecta a bateria da carga quando a mesma atinge um determinado valor mínimo de tensão pré-estabelecido e volta a conectá-la quando este valor volta a ser atingido ou superado. Esse dispositivo é importante para evitar uma descarga profunda, que influencia negativamente na vida útil da bateria. O dispositivo de bloqueio de corrente reversa atua no sentido de evitar que a bateria ceda corrente ao painel fotovoltaico nos momentos em que este não está produzindo energia.

Controlador de Carga

Em sistemas isolados, que fazem uso de baterias, o controlador ou regulador de carga é necessário para conservar o bom funcionamento da bateria. Dentre as funções do controlador de carga, Villalva (2012) destaca a proteção de sobrecarga e de descarga excessiva e o gerenciamento de carga da bateria, que inclui o estágio de carregamento pesado, estágio de absorção e de flutuação.

A função de proteção de sobrecarga tem como objetivo evitar que a bateria continue a ser carregada quando a tensão de carga é atingida, enquanto que a proteção de descarga excessiva corta o fornecimento de energia da bateria para a carga quando esta atinge um nível muito baixo e determinado de carga [1].

A função de gerenciamento de carga é mais sofisticada e não está presente em todos os controladores. Basicamente nela, o objetivo é manter o perfil de carga da bateria dividindo o processo de recarga em três etapas: carregamento pesado, absorção e flutuação [1]. Na primeira, o objetivo é carregar a bateria rapidamente, entregando o máximo de corrente que o módulo é capaz de fornecer. Quando atinge determinado nível de tensão, inicia-se o estágio de absorção. A corrente entregue à bateria vai decrescendo, a bateria já está praticamente carregada porém lentamente é possível atingir o nível completo de carga (100%). O estágio de flutuação exige pouca corrente. Nessa etapa a bateria está carregada e a função do controlador é mantê-la assim.

Villalva (2012) destaca em seu trabalho quatro controladores principais. São eles: convencional com chave série, convencional com chave paralelo, controlador eletrônico com *PWM* e controlador eletrônico com *PWM* e *MPPT*.

Os controladores convencionais funcionam, basicamente, como uma chave que é aberta ou fechada dependendo do estado de carga da bateria. Os controladores com chave série tem o chaveamento em série com a bateria, ou seja, quando fechada, a corrente do módulo flui livremente

para a bateria e para a carga e quando aberta, cria um circuito aberto entre o módulo e o restante do sistema, impedindo a passagem de corrente [1]. Há também uma chave em série entre a bateria e a carga, que serve para evitar a descarga excessiva. Controladores com chave paralelo tem a chave em paralelo à bateria, portanto quando aberta, a corrente flui do módulo para o restante do sistema e quando fechada cria um curto-circuito nos terminais do módulo que impede que os demais componentes do circuito recebam energia. Uma segunda chave, como na situação anterior, conecta a bateria à carga e tem o mesmo objetivo. Villalva (2012) afirma que o curto-circuito provocado pela situação do controlador com chave paralelo não é prejudicial ao painel fotovoltaico pois sua corrente máxima é limitada pela corrente de curto-circuito especificada pelo fabricante.

Os controladores eletrônicos com *PWM* (*Pulse Width Modulation*) são mais complexos do que os controladores convencionais e são compostos por transistores e circuitos eletrônicos que controlam precisamente a corrente de carga [1]. O controlador eletrônico com *PWM* possui um microprocessador que, por meio de um algoritmo específico, gerencia a carga da bateria conforme os estágios citados anteriormente, além de, logicamente, desempenhar as mesmas funções do controlador convencional.

Por fim, o controlador eletrônico com *PWM* e *MPPT* tem a mesma função do último descrito e, além disto, tem um algoritmo de controle que rastreia o melhor ponto de operação do painel fazendo com que a máxima potência seja entregue à carga [1]. Basicamente, o algoritmo *MPPT* deve operar de forma que o módulo fotovoltaico trabalhe em torno da tensão de máxima potência (V_{MP}). Villalva (2012) cita em seu trabalho que sistemas com controladores do tipo *MPPT* tem um ganho de 30% na produção de energia. O capítulo seguinte, RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – ALGORITMOS *MPPT*, descreverá esse tipo de controlador com mais detalhes.

Conversor CC/CC

Seguel (2009) sinaliza a importância do conversor estático CC/CC para que a tensão de saída do banco de baterias seja elevada àquela apropriada na entrada do inversor. Basicamente, os conversores estáticos CC/CC têm função de elevar ou reduzir a tensão de entrada e são divididos em três categorias principais: *Step-down* ou *Buck*, *Step-up* ou *Boost* e *Buck-Boost*. O primeiro, abaixador de tensão, o segundo, elevador e o terceiro, abaixador-elevador. Nos sistemas fotovoltaicos, o conversor tem a função principal de adequar o nível de tensão produzido nos

terminais do módulo para o valor exigido pelo barramento CC seguir o ponto de máxima potência, *MPPT* [16].

Inversor

A geração fotovoltaica é em corrente contínua, portanto a utilização do inversor faz-se necessária no sistema uma vez que grande parte das cargas utilizadas hoje em dia opera em corrente alternada. Tipicamente são encontrados no mercado inversores que recebem tensões de entrada de 12 V, 24 V ou 48 V e entregam na saída 127 V ou 220 V na frequência de 60 Hz, no Brasil.

O inversor é um dispositivo eletrônico que tem como princípio de funcionamento o chaveamento do circuito utilizando transistores que, seguindo uma determinada lógica, invertem a polaridade dos terminais de saída da corrente fazendo com que o este sinal tenha componentes no primeiro e segundo quadrantes, característica da corrente alternada [1]. O circuito do inversor pode ser bastante complexo, composto por transistores, indutores, capacitores. Com o avanço da eletrônica de potência, a base dos inversores hoje em dia são os *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* e *MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)* [17].

Algumas características, descritas a seguir, devem ser consideradas no momento de escolha do inversor e parâmetros da folha de dados devem estar de acordo com a instalação para a boa operação do equipamento.

A potência nominal é a potência que o inversor pode fornecer e deve estar de acordo com a potência exigida pela carga [1]. A potência máxima é aquela que o inversor pode fornecer em situações de sobrecarga em um curto intervalo de tempo [1]. Tensão de entrada CC, tensão de saída CA e frequência de saída são, respectivamente os valores aceitos de tensão na entrada e saída do inversor e a frequência da corrente alternada que será fornecida [1]. A regulação de tensão diz respeito à variação de tensão relativa à tensão de saída do inversor quando alguma carga conectada a este está em uso [1]. Eficiência diz respeito à potência de saída em relação à de entrada.

A forma da onda de saída também é uma característica que se deve observar no momento de escolha do inversor, pois essa propriedade interfere diretamente na qualidade do sinal. Villalva (2012) cita que três formas de onda são encontradas nos inversores comerciais atualmente, são eles: de onda senoidal pura, de onda senoidal modificada e de onda quadrada. Ainda no quesito qualidade, a distorção harmônica é um fator extremamente importante e que deve ser considerado, quanto menor for a distorção harmônica do inversor, melhor [1].

Em termos de proteção do equipamento, avalia-se a proteção de curto-circuito e a proteção de reversão da polaridade. No primeiro caso, o inversor com proteção de curto-circuito permite que seus terminais entrem em curto-circuito sem que o equipamento seja danificado. Quando com a proteção de reversão de polaridade, caso a polaridade seja trocada, o aparelho não será queimado [1].

Quanto ao tipo de inversor, Villalva (2012) destaca: inversor de onda quadrada e de onda senoidal modificada, inversor *PWM* de onda senoidal pura e o inversor interativo com a rede. O inversor de onda quadrada e de onda senoidal modificada apresentam um sinal de saída de onda quadrada e semiquadrada respectivamente, porém ainda muito distorcido do sinal senoidal e com distorção harmônica [1]. Geralmente são utilizados para cargas menos ou não sensíveis a distorção de tensão como circuitos de iluminação e eletrodomésticos. O inversor *PWM* de onda senoidal pura apresenta distorção harmônica mínima e o sinal de saída se aproxima bastante a uma senoide [1]. Por fim, inversores interativos com a rede são aqueles que tem uma interface entre a rede elétrica e o sistema de armazenamento e geralmente são utilizados em sistemas de emergência para aplicações não autônomas [1].

2.5. DESCRIÇÃO DE SISTEMAS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Sistemas de geração fotovoltaica conectados à rede de distribuição de energia elétrica visam produzir energia de forma complementar. A configuração desse sistema é mais simples, pois o mesmo é composto, basicamente, pelos geradores fotovoltaicos, inversor e a rede elétrica [18], conforme pode ser visto na Fig. (13).



Figura 13 - Configuração do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. (Fonte: [18])

O componente que merece atenção especial nesse caso é o inversor, que apesar de desempenhar a mesma função do que no caso de sistemas autônomos, converter a corrente contínua em corrente alternada, apresenta algumas particularidades que o difere por fazer essa interface entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica.

Inversor

Zilles (2012) classifica o inversor como o “coração” do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica. Esse tipo de inversor é chamado de *grid-tie* ou *grid-connected*. A grande particularidade que difere o inversor dos sistemas conectados à rede daqueles utilizados em sistemas autônomos é que no primeiro, o inversor funciona como uma fonte de corrente, fornecendo corrente ao circuito ao invés de tensão, como ocorre em inversores de sistemas autônomos [1]. Outra característica interessante é que o inversor neste tipo de sistema só opera quando a rede de eletricidade está ligada [1]. Caso haja falha na rede por qualquer motivo, o inversor é automaticamente desconectado e a energia gerada nos painéis é desperdiçada. A base de funcionamento por meio de transistores se mantém nesse caso, porém o nível de especificação do equipamento é maior. É importante também ressaltar que todo inversor utilizado para a conexão de módulos fotovoltaicos à rede elétrica tem a função de rastrear o ponto de máxima potência ([1], [18]) por meio de algoritmos de controle que serão detalhados no capítulo seguinte.

Dentre as características a serem observadas estão a faixa útil de tensão contínua na entrada, tensão contínua máxima na entrada, número máximo de módulos conectados, número de entradas independentes com *MPPT*, tensão de operação na conexão com a rede, frequência da rede elétrica, distorção da corrente injetada na rede, grau de proteção, temperatura de operação, umidade relativa do ambiente, consumo de energia parado, consumo de energia noturno, potência de corrente contínua na entrada, potência de corrente alternada na saída e rendimento [1].

Muitas das informações do fabricante a respeito do inversor vêm em forma de gráfico. Zilles (2012) destaca as curvas de isopotência e de eficiência. A primeira dá a relação entre a corrente de entrada no inversor, fornecida pelo sistema fotovoltaico, em função da tensão também fornecida pelo sistema na entrada do inversor. Essa curva indica que o inversor pode operar com níveis de corrente que estejam fora do valor estabelecido pelo fabricante, desde que a tensão se mantenha na faixa de valores especificada [18]. A curva de eficiência relaciona a eficiência do inversor em função do quociente entre a potência de saída do inversor e potência nominal do mesmo [18]. Essa curva indica o ponto de melhor eficiência, que não está diretamente relacionado ao acréscimo no valor do quociente, portanto não caracteriza uma relação linear.

Inversores que permitem a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica possuem alguns recursos e funções que não estão presentes em inversores utilizados em sistemas isolados. Um recurso importante, especialmente no momento de manutenção, é a chave de desconexão de

corrente contínua. Ela permite que o usuário desligue o sistema manualmente sem que haja a necessidade de desconectar cabos elétricos e afins. Existe também a proteção contra corrente de fuga, que monitora a fuga de corrente para a terra e desliga o equipamento na presença desse tipo de corrente [1]. Uma função exigida por norma é a detecção de ilhamento e reconexão automática [1]. Na situação em que a rede elétrica deixa de fornecer energia, o inversor e, conseqüentemente, o sistema fotovoltaico, deve ser imediatamente desligado, até mesmo por uma questão de segurança caso algum equipamento esteja em manutenção para que a rede não continue a receber corrente do sistema. No momento em que for detectado o religamento da rede elétrica, o inversor é automaticamente reconectado. Não é estipulado por norma, mas alguns inversores podem possuir um transformador de isolação, que torna o sistema mais seguro [1].

A função de rastreamento do ponto de máxima potência, como já dito anteriormente, está presente em todos os inversores *grid-tie* e, por meio de algoritmos de controle, mantem os níveis de tensão e corrente do painel ajustados de forma que a máxima potência seja obtida ([1], [18]). Essa função é de extrema importância para que se extraia a maior quantidade de energia possível, mesmo que em condições não favoráveis, como dias nublados ou muito quentes. O próximo capítulo, RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – ALGORITMOS *MPPT*, é dedicado a detalhar esse processo.

3. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – ALGORITMOS *MPPT*

Como já visto anteriormente, a eficiência de sistemas fotovoltaicos não é elevada, portanto qualquer alternativa que seja capaz de extrair mais potência do sistema é válida. O rastreamento do ponto de máxima potência é uma técnica interessante e essencial no sentido de se aumentar a eficiência global do sistema [18]. Em sistemas isolados, essa função pode estar presente no controlador de carga e em sistemas conectados à rede elétrica, está obrigatoriamente presente no inversor ([1], [18]). Além de melhorar a produção energética, o rastreamento do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico também aumenta a vida útil do mesmo [19].

A vantagem do rastreamento do ponto de máxima potência é que independente da condição climática, seu algoritmo irá forçar o sistema a operar em torno da máxima potência durante todo o período de tempo. Isso se deve ao fato de que os métodos desenvolvidos operam de forma a controlar a corrente ou tensão de saída, forçando-as a permanecerem em regiões próximas à V_{MP} e I_{MP} na curva $I - V$. O conhecimento e caracterização do sistema em que o controle será aplicado é muito importante para que se obtenha melhor eficiência do método escolhido e está é definida pela Eq. (2) ([18], [19]).

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_{FV}(t) dt}{\int_0^t P_M(t) dt} \quad (2)$$

Vários métodos estão disponíveis no que diz respeito ao rastreamento do ponto de máxima potência e se diferem entre eles seja pela complexidade, sensores utilizados, velocidade de convergência, custo, eficiência até popularidade [19]. Salas (2006) destaca que algoritmos de *MPPT* começaram a ser utilizados nos anos de 1970 em aplicações aeroespaciais. Os métodos podem ser classificados pelo tipo de dados utilizados, como sendo de controle direto (*offline*) e indireto (*online*) ([14], [19]), ou pela quantidade de variáveis controladas, com uma ou duas variáveis [14].

Os métodos de controle indireto são aqueles que trabalham com os parâmetros do painel fotovoltaico, ou seja, como as curvas típicas para diferentes irradiações e temperaturas e equações características para a definição do ponto de máxima potência, enquanto os métodos de controle direto usam dados de corrente e voltagem medidos no momento da operação ([14], [19]). Estes são

vantajosos pois podem ser aplicados a qualquer sistema sem que haja um conhecimento prévio do mesmo, porem são mais complexos e robustos.

Em relação à quantidade de variáveis, os algoritmos podem ser classificados como de uma variável ou de duas variáveis. O primeiro só faz uso de uma variável para o controle da máxima potência, ou seja, leva em conta somente a variação de tensão ou de corrente [14]. O método de duas variáveis considera as duas variáveis (corrente e tensão) no momento de definir a máxima potência [14].

Assim, as técnicas existentes são divididas ou pela forma de controle aplicada ou pela quantidade de variáveis analisadas. Como a classificação pelo método de controle, direto ou indireto, é mais abrangente, este trabalho irá focar esforços em descrever alguns dos métodos mais empregados ([1], [14], [16], [18], [19], [20]) relacionando-os à classificação de controle direto ou indireto.

3.1. ALGORITMOS DE CONTROLE INDIRETO

Nesse tipo de aplicação, o sinal do controle, ou seja, o comando, vem de dados previamente conhecidos do módulo fotovoltaico. Também são denominados na literatura [19] de métodos *offline* ou *model-base* por se basearem no modelo ao invés de dados coletados em tempo real. Dois dos algoritmos que recebem essa classificação serão tratados no presente trabalho por serem descritos em maior quantidade na literatura ([14], [19]).

3.1.1. Método da Tensão Constante

Esse método é considerado um dos mais simples em se tratando de algoritmos *MPPT* [19]. Ele leva em consideração a relação linear entre a tensão de máxima potência (V_{MP}) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}), Eq. (3). A constante de proporcionalidade depende das condições de fabricação do módulo, condições meteorológicas, entre outros [14].

$$V_{MP} = k_1 \times V_{OC} \quad (3)$$

No método, frequentemente a tensão de circuito aberto é medida para que a tensão de máxima potência seja calculada. Para que ocorra essa medição, a operação do sistema é

interrompida. A operação do painel passa então a ser ajustada de acordo com a V_{MP} calculada. O diagrama de fluxo do algoritmo é apresentado na Fig. (14).

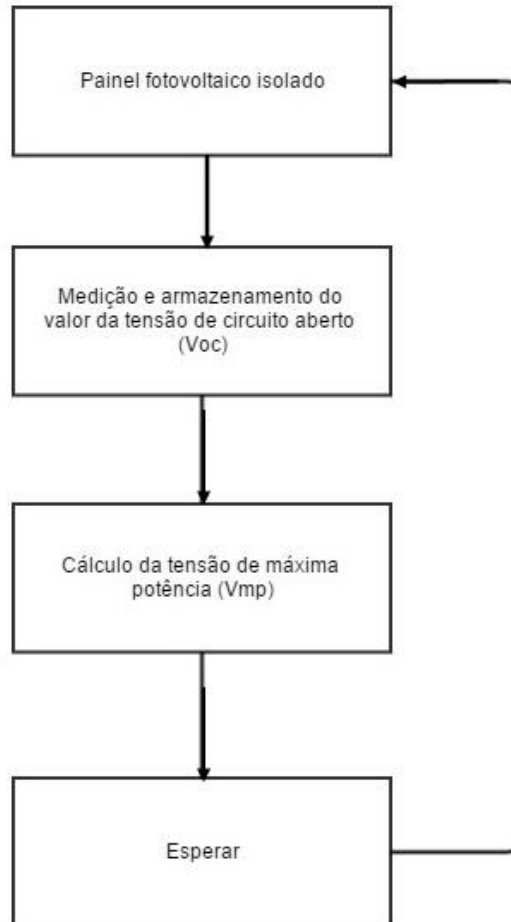


Figura 14 - Diagrama de fluxo do método da voltagem em circuito aberto. (Fonte: [14], [19])

Esse método não considera alterações na temperatura e irradiação, além de ter o inconveniente de interromper a operação. O valor da constante, segundo referências ([14], [19]), deve estar entre 0,73 e 0,8 para células de silício policristalino e o intervalo entre medições deve ser de 15 ms. Apesar dos seus inconvenientes, a técnica é simples e barata, podendo ser uma boa opção, dependendo da aplicação.

3.1.2. Método da Corrente Constante

O método da corrente de curto-circuito é bastante similar ao método da tensão de circuito aberto. Da mesma forma, a corrente de máxima potência (I_{MP}) é comparada à corrente de curto-

circuito (I_{SC}) por meio de uma relação linear, descrita pela Eq. (4). Novamente, no momento da medição, a operação é interrompida.

$$I_{MP} = k_2 \times I_{SC} \quad (4)$$

Nesse caso, a constante de proporcionalidade depende dos mesmos fatores citados anteriormente, porém sua determinação é mais trabalhosa. A literatura ([14], [19]) recomenda que esta se mantenha entre os valores de 0,8 e 0,9 para células de silício policristalino. O fluxograma desse método é igual ao do anterior, porém este é mais eficiente [19].

Os dois métodos de controle indireto são bastante simples e ineficientes no que diz respeito à máxima produção de potência. Reisi (2013) destaca dois motivos: a interrupção na operação no momento de obter os valores de tensão e corrente e o fato de que o ponto de máxima potência não ser alcançado por meio das relações lineares. No entanto, devido à sua simplicidade, ambos podem ser aplicados dependendo da situação.

3.2. ALGORITMOS DE CONTROLE DIRETO

Os algoritmos de controle direto usam dados instantâneos para gerar os sinais de controle. São também chamados de métodos *online* ou *model-free* justamente por não fazerem uso de informações prévias do sistema. São os métodos mais aplicados por serem mais precisos e eficientes. Dois desses métodos serão discutidos nos tópicos seguintes e a escolha destes se baseou na quantidade de documentação disponível na literatura a respeito de cada um ([1], [14-20]).

3.2.1. Método Perturba e Observa (P&O)

O método do perturba e observa é o mais utilizado comercialmente por sua facilidade de implementação ([1], [16], [20]), porém não há um consenso em afirmar que é o método mais eficiente. A técnica é bem simples e consiste em medir o valor de tensão e potência em um dado momento, alterá-lo em uma quantidade diferencial ΔV e medir as novas tensão e potência. Caso o novo valor de potência seja maior, a perturbação por ΔV continua no mesmo sentido e caso a nova potência seja menor, a perturbação vai em sentido oposto. A Figura (15) mostra como se comporta a perturbação na tensão para valores de ΔV positivo e negativo.

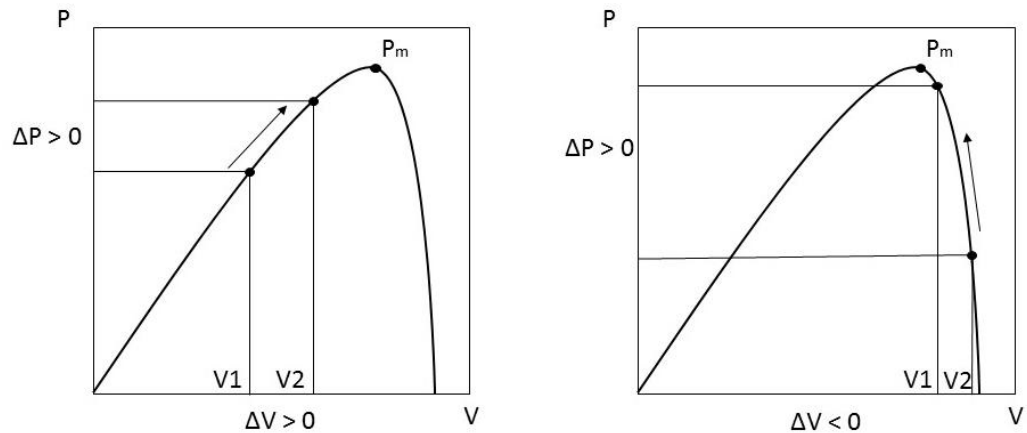


Figura 15 - Comportamento do método P&O na curva P - V .

No momento da definição desse método, dois fatores devem ser considerados, o período de amostragem, ou seja, a diferença de tempo entre cada medição e o valor do incremento da tensão. Valores muito pequenos de tempo de amostragem podem não ser possíveis por limitações do controlador, porém permitem uma melhor detecção de variações climáticas que interfiram na potência. Em relação ao incremento de tensão, quando este valor é pequeno, o sistema fica mais sensível ao valor da máxima potência, porém novamente, limitações no controlador impedem que este número seja muito pequeno.

Também é importante notar que o caráter dinâmico do método, de sempre alterar a tensão para mais ou para menos em torno do ponto de máxima potência tem como consequência o fato de que o ponto de máxima potência efetivamente nunca será alcançado, o módulo estará sempre atuando em torno deste ponto, mas não nele. O fluxograma do algoritmo utilizado nessa técnica está disposto na Fig. (16).

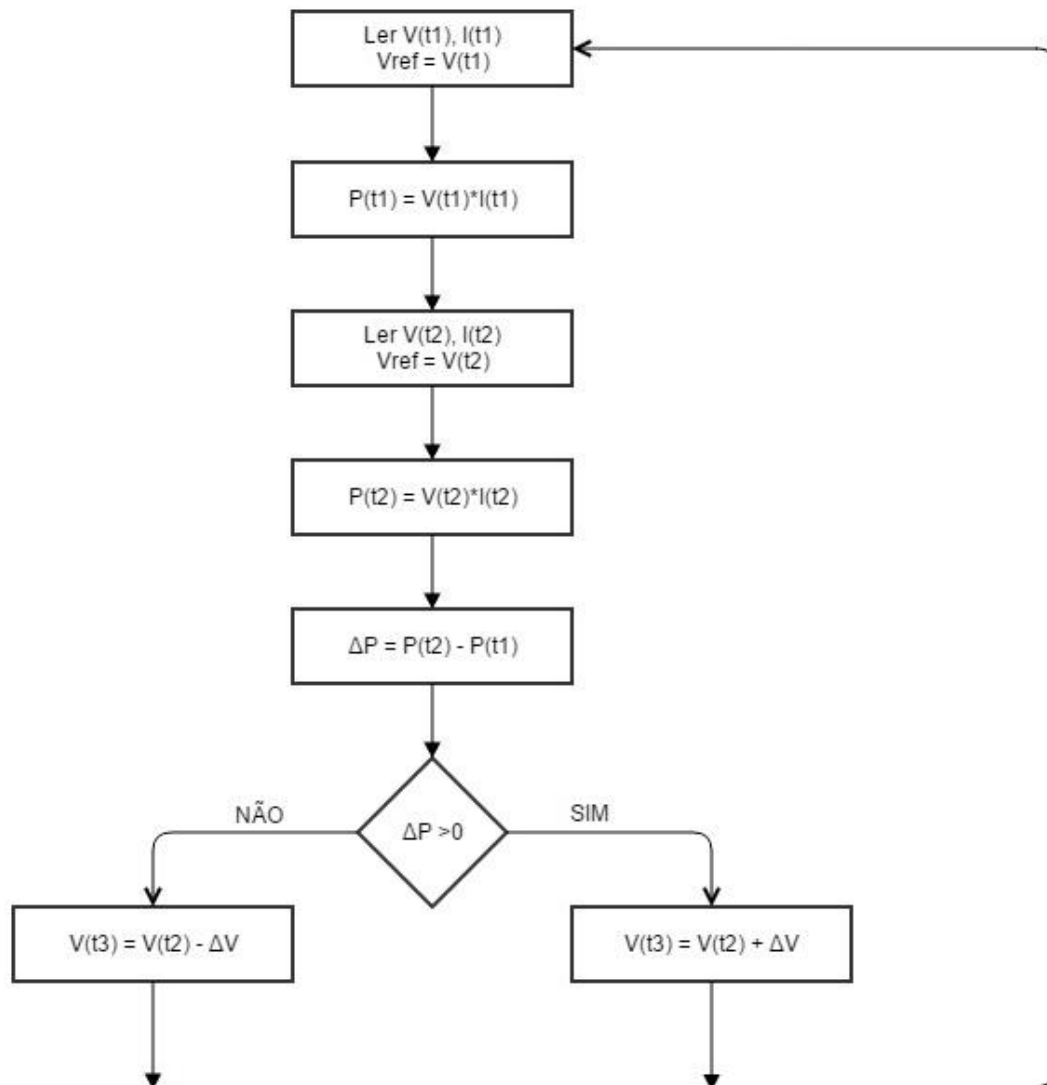


Figura 16 - Fluxograma do comportamento do algoritmo do método P&O.

O método apresenta como vantagens a não necessidade de conhecimento prévio do sistema fotovoltaico, simplicidade de implementação, porém alterações de temperatura e irradiação podem ser interpretadas de forma errada e o sistema nunca irá operar em cima do ponto de máxima potência. No entanto, várias alterações estão sendo propostas de forma a tornar o método mais eficiente [20].

3.2.2. Método da Condutância Incremental (IncCond)

O método da condutância incremental é muito similar ao método P&O, a diferença é que no IncCond, o módulo fotovoltaico consegue operar no seu ponto de máxima potência.

Basicamente esse método consegue identificar a região da curva P - V em que a operação se encontra e desloca a tensão de forma a aproxima-la da tensão V_{MP} por meio da derivada da potência em relação à tensão. A Eq. (5) é válida no ponto de máxima potência (MPP).

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (5)$$

Rearranjando-a, tem-se a Eq. (6), que dá origem às relações presentes na Tab. (3).

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (6)$$

Tabela 3 - Relações possíveis de dP/dV .

$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$	$\frac{dP}{dV} = 0$	$V_{PV} = V_{MP}$
$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$	$\frac{dP}{dV} > 0$	$V_{PV} < V_{MP}$
$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$	$\frac{dP}{dV} < 0$	$V_{PV} > V_{MP}$

O método então consiste em alterar a tensão de saída do módulo de forma a atingir a primeira relação da terceira coluna da Tab. (3), $V_{PV} = V_{MP}$. Quando essa relação é estabelecida, o sistema não sofre perturbações, até que a tensão do painel volte a ser alterada. Essa técnica consegue prever alterações climáticas no momento em que V_{PV} sofre alteração depois de já ter sido definido pelo controle. Quando $dV = 0$ e $dI > 0$, há aumento na quantidade de radiação e, no caso contrário ($dV = 0$ e $dI < 0$) há diminuição. Nesse caso, assim como no P&O, deve-se definir o valor do incremento de tensão e o tempo de amostragem.

O fluxograma da Fig. (17) mostra como o método da condutância incremental age em relação à tensão.

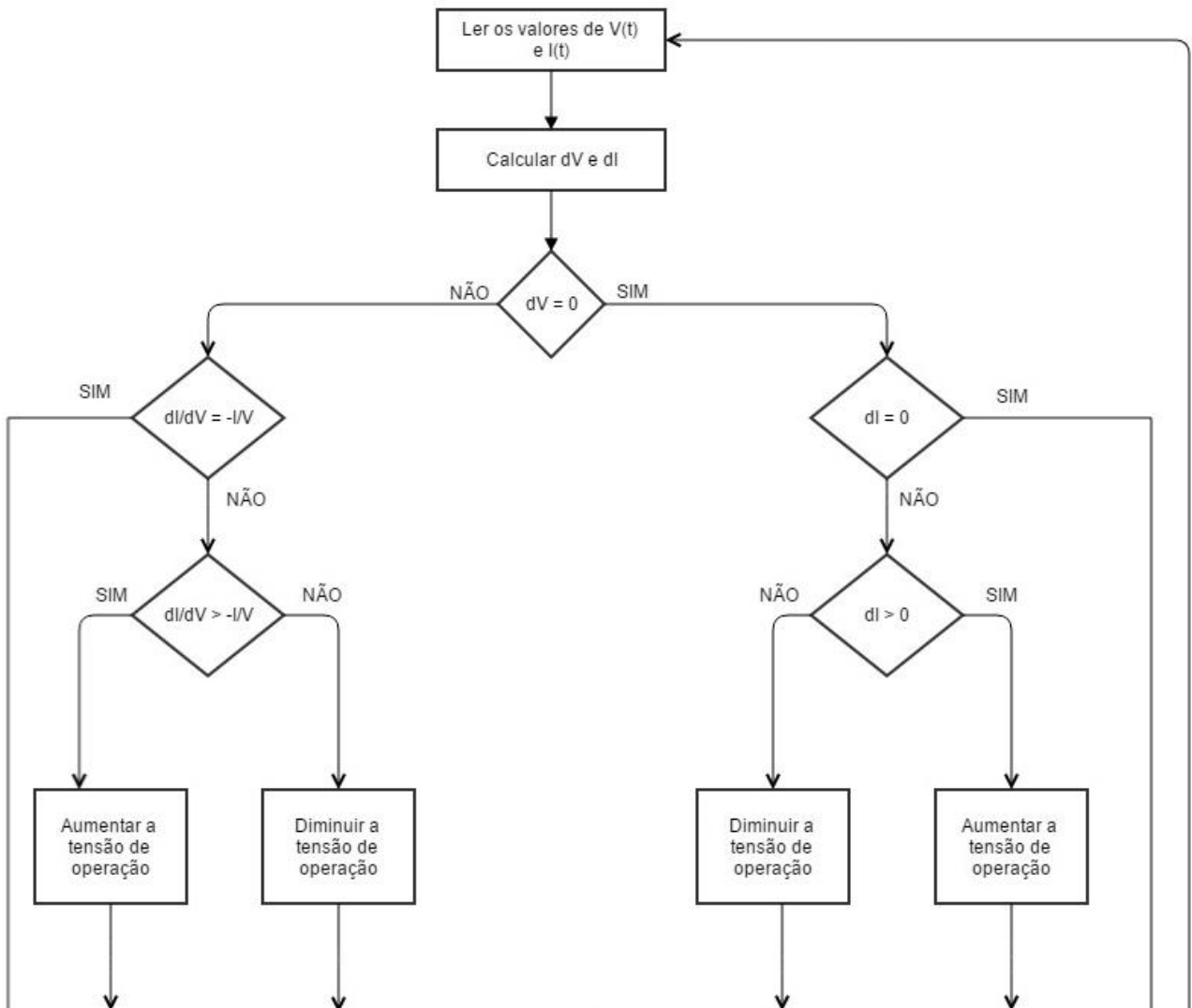


Figura 17 - Fluxograma do método IncCond.

A grande desvantagem desse método é requerer um complexo circuito de controle, porém em aspectos gerais o método é bastante eficiente.

A escolha da técnica de controle de tensão e rastreamento do ponto de máxima potência depende muito do sistema a ser aplicado. Assim, o capítulo seguinte busca caracterizar o sistema fotovoltaico em que o algoritmo será empregado.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica pode ser descrita matematicamente e suas curvas $I - V$ e $P - V$ são resultado das relações existentes entre as variáveis. Existem dois modelos principais que são usados como circuito equivalente, o modelo de um diodo e o modelo de dois diodos. Nesse trabalho será tratado apenas o circuito equivalente com um diodo. Portanto, O circuito equivalente é composto por uma fonte de corrente, I_{pv} em paralelo com um diodo e uma resistência, R_p e em série com a resistência R_s . Esse modelo ideal se aproxima ao comportamento real da célula pois as resistências representam perdas por perturbações elétricas e pontuais na zona de transição P-N (R_p) e a queda de tensão resultante de perdas ôhmicas do material semiconductor (R_s) [16]. A Figura (18) mostra o circuito equivalente.

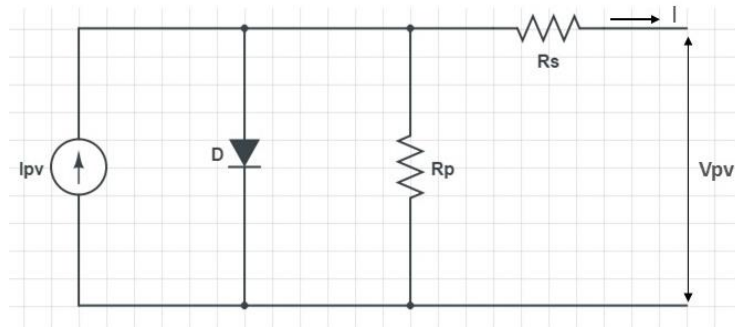


Figura 18 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A corrente de saída I é obtida por meio da Eq. (7), onde I_r é a corrente de saturação reversa da célula, n é o fator de idealidade da junção, q é a carga do elétron, k é a constante de *Boltzmann* e T é a temperatura da célula ([15], [16], [19], [21]). É importante definir que o fator de idealidade da junção está relacionado às características do diodo no modelo equivalente e seu valor varia entre 1 e 2 [23].

$$I = I_{pv} - I_r \times \left[e^{\frac{q(V_{pv} + IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_p} \quad (7)$$

A corrente de saturação reversa é função da temperatura e pode ser obtida com Eq. (8), em que I_{rr} , Eq. (9), é a corrente de saturação reversa na temperatura T_r , que é a temperatura de referência, E_G é a energia do *band-gap* do material da célula [16].

$$I_r = I_{rr} \times \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \times e^{\left[\frac{qE_G}{nk} \times \left(\frac{1}{T_r} + \frac{-1}{T}\right)\right]} \quad (8)$$

$$I_{rr} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{V_{OC}}{V_T} - 1}} \quad (9)$$

A corrente I_{pv} é função da temperatura e da irradiação, como já era previsto, e pode ser determinada com a Eq. (10). I_{sc} é a corrente de curto-circuito, α_T é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito e S é a irradiação, em W/m^2 [16].

$$I_{pv} = [I_{sc} + \alpha_T \times (T - T_r)] \times \frac{S}{1000} \quad (10)$$

Os coeficientes α_T e E_G determinam a influência da temperatura no comportamento da célula. A corrente elétrica aumenta com a temperatura e o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito é de $0,06\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ou $0,03 \text{ mA } ^\circ\text{C}^{-1}$ para módulos de silício cristalino [23]. A energia do *band-gap* do material é determinada conforme a Eq. (11) em que $E_G(0)$ é a energia de referência e a e b são constantes do material [23].

$$E_G(T) = E_G(0) - \frac{aT^2}{T+b} \quad (11)$$

A Tabela 4 contém os dados de $E_G(0)$ e a e b para o silício (Si) e o arsenieto de gálio (GaAs).

Tabela 4 – Dados para a obtenção da energia do *band-gap* do silício (Si) e do arsenieto de gálio (GaAs). (Fonte: [23])

Material	$E_G(0)$ [eV]	a [$10^{-4} \text{ eV.K}^{-1}$]	b [K]
Si	1,16	7	1100
GaAs	1,52	5,8	300

Normalmente os módulos fotovoltaicos são um arranjo de células associadas em série ou em paralelo, sendo a primeira mais frequente, para que a tensão de saída seja maior ([16], [23]). Dessa forma, Bühler (2007) prevê a equação que calcula a corrente fornecida por um módulo fotovoltaico. Sendo V_T definido pela Eq. (12) onde N_S representa a quantidade de células em série.

$$V_T = \frac{N_S \times n \times k \times T}{q} \quad (12)$$

Combinado as Equações (7) e (12) a corrente de saída do módulo pode ser obtida por meio da relação presente na Eq. (13).

$$I = I_{pv} - I_r \times \left[e^{\frac{(V_{pv} + IR_s)}{V_T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_p} \quad (13)$$

Os parâmetros adotados para a simulação proposta estão apresentados na Tab. (5).

Tabela 5 - Constantes utilizadas na modelagem matemática.

Constantes	
Rs - Resistência Série [Ω]	0,005
Rp - Resistência Paralelo [Ω]	100.000
n - Fator de idealidade do diodo	1,2
Ns - N° de células em série	60
k - Constante de Boltzmann [J/K]	1,38E-23
T - Temperatura [K]	298
q - Carga do elétron [C]	1,60E-19
Isc - Corrente de curto circuito [A]	8,98
Voc - Tensão de circuito aberto [V]	38,9
αT - Coeficiente de temperatura da Isc [mA/°C]	0,03
Tr - Temperatura de referência [K]	298
S - Irradiação [W/m^2]	1.000
a - Coeficiente da Eq. (10)	7,00E-04
b - Coeficiente da Eq. (10)	1.100
E(0) - Energia de band-gap de referência [eV]	1,16

A Equação (13) é a relação entre corrente e tensão presente na curva $I - V$ e a curva $P - V$ é obtida da Eq. (14), onde o ponto de máxima potência, já descrito anteriormente, é obtido quando a derivada da potência em relação à tensão é nula, como é mostrado na Eq. (5), no item 3.2.2.

$$P = I \times V_{pv} \quad (14)$$

Com o conjunto de equações definidos neste capítulo, a análise feita será em cima da comparação entre a potência máxima obtida quando determinadas condições são variadas, como temperatura, irradiação, a resistência em paralelo e em série e o fator de idealidade da junção.

5. RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO

O objetivo dessa etapa é observar o comportamento de um painel fotovoltaico baseado no modelo equivalente de um diodo considerando o equacionamento apresentado no item anterior. As características do módulo não são de extrema importância nesse momento, uma vez que diversos fatores foram variados e o foco se concentra em observar a máxima potência em cada uma das situações analisadas. Foram feitas variações na irradiação, temperatura, resistência série, resistência paralelo e no fator de idealidade do diodo para que se observasse o comportamento do ponto de máxima potência.

Os tópicos seguintes deste capítulo irão abordar cada uma das cinco variações propostas e os resultados obtidos.

5.1. INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO NO DESEMPENHO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O primeiro valor a ser variado foi a irradiação. No modelo real esse valor nunca é completamente constante, por isso a importância de se determinar o comportamento do sistema sob efeito desse tipo de variação. De acordo com a Eq. (10) a foto-corrente I_{pv} é a única variável relacionada à irradiação e esta relação é direta, portanto quanto maior for a irradiação, maior será a foto-corrente e, conseqüentemente, maior será a corrente oriunda do sistema fotovoltaico em direção à carga (I). Os gráficos das Fig. (19) e Fig. (20) mostram as curvas $I - V$ e $P - V$ para valores de irradiação de 200 W/m^2 , 400 W/m^2 , 600 W/m^2 , 800 W/m^2 e 1.000 W/m^2 .

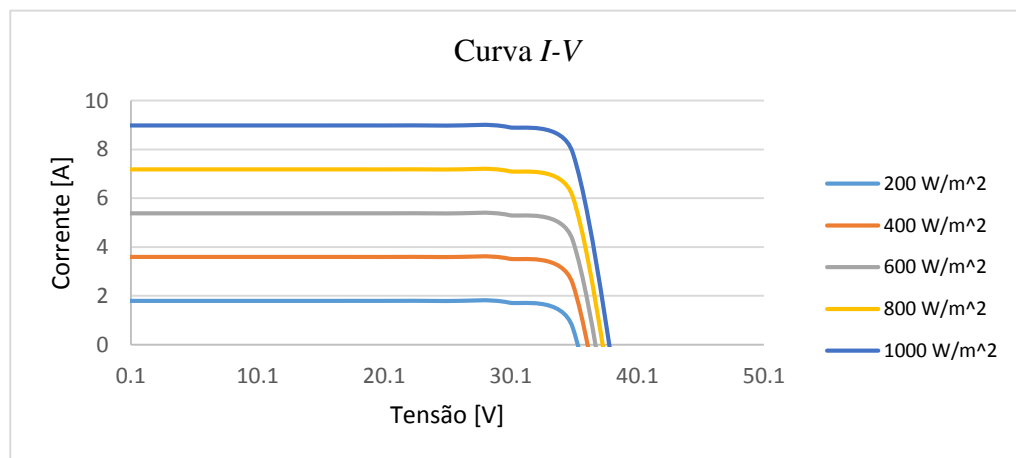


Figura 19 – Influência da irradiação na Curva $I - V$.

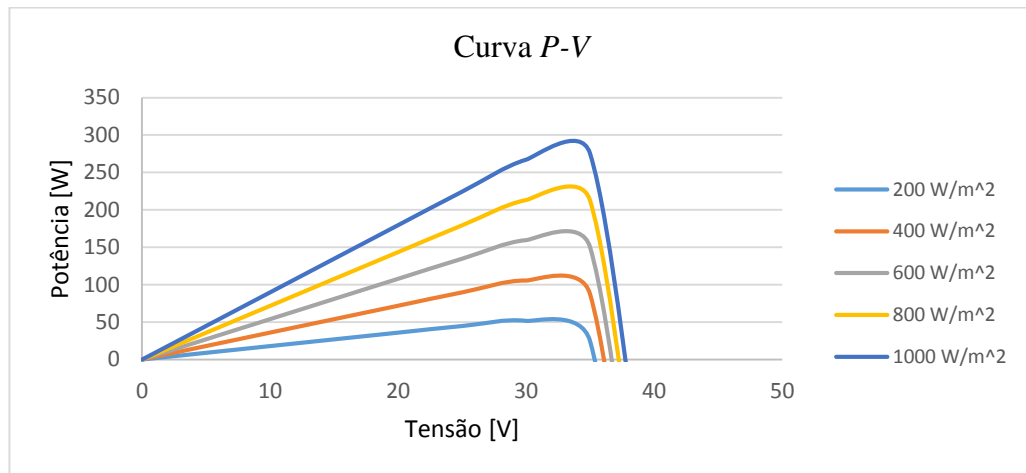


Figura 20 – Influência da irradiação na Curva $P - V$.

Conforme já previsto em teoria, o desempenho do painel em termos de potência é melhor quando a irradiação é maior. Nota-se também a corrente de curto circuito varia consideravelmente para cada caso ilustrado enquanto a tensão de circuito aberto tem menor variação quando comparados os cinco casos, ou seja, a corrente é mais sensível à variação de irradiação. A Tabela 6 contém os valores de máxima potência e suas respectivas tensão e corrente. Analisando essas informações, nota-se novamente que o melhor desempenho está relacionado à situação de maior irradiação e que, conforme indicado no gráfico da Fig. (19) a corrente de máxima potência assume valores bastante diferentes para cada situação enquanto a tensão é menos sensível a esse tipo de alteração.

Tabela 6 – Dados da máxima potência para diferentes irradiações.

	P_M (W)	V_{MP} (V)	I_{MP} (A)
200 W/m ²	53.4	31	1.67
400 W/m ²	111.3	32	3.37
600 W/m ²	170.6	32	5.17
800 W/m ²	231.4	33	6.81
1000 W/m ²	292.4	33	8.6

5.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

A temperatura se relaciona com a corrente de saída do módulo, influenciando a fotocorrente, a corrente de saturação reversa e o V_T . O acréscimo na temperatura reduz a corrente de saída e, conseqüentemente, a potência máxima. O gráfico da Fig. (21) mostra a como a corrente se comporta em relação à tensão. É possível observar que a tensão é mais sensível à variação de temperatura enquanto que a corrente se comporta praticamente da mesma forma para todas as temperaturas analisadas (0 °C, 25 °C, 50 °C e 75 °C).

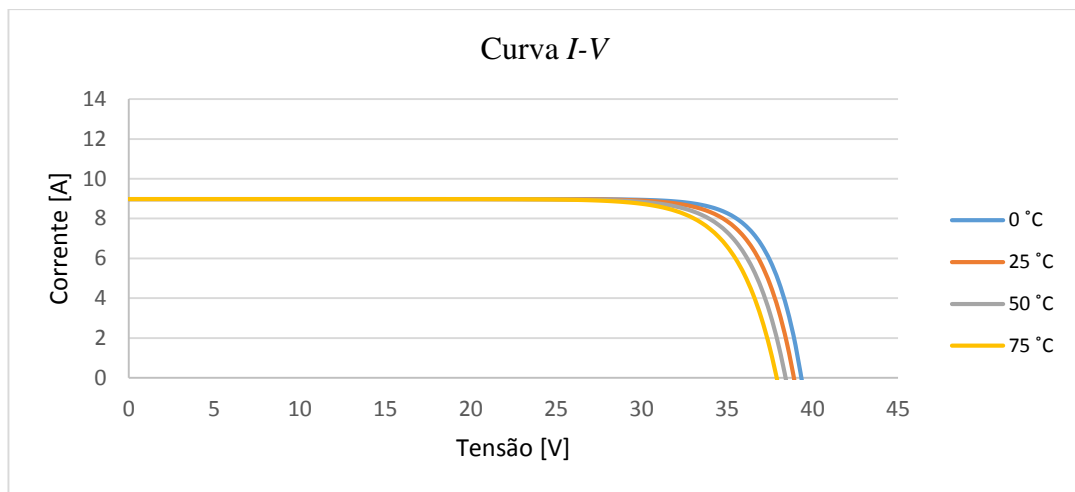


Figura 21 – Influência da temperatura na Curva $I - V$.

Como consequência do fato de que a menor temperatura é a condição de maior geração de corrente, o desempenho do módulo é melhor nessa mesma situação também, como pode ser visto na Fig. (22).

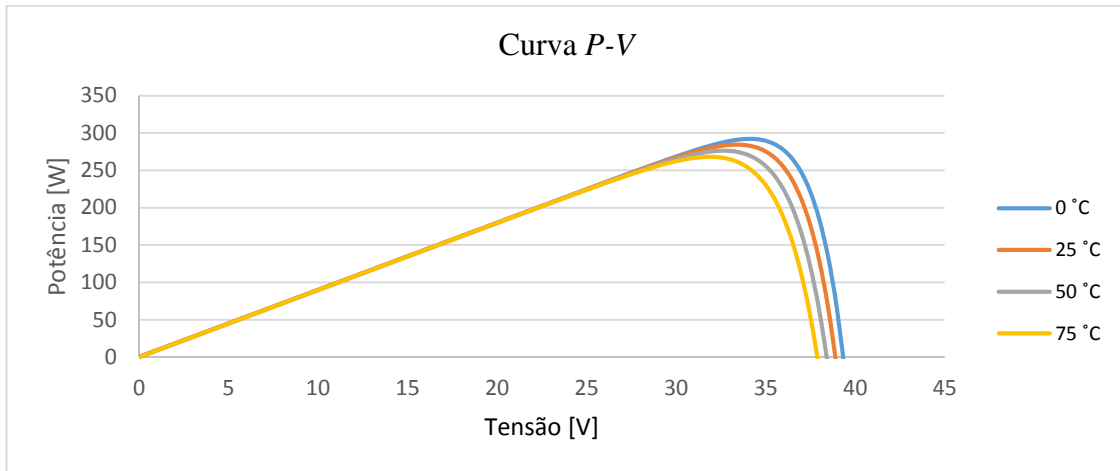


Figura 22 – Influência da temperatura na Curva $P - V$.

Como já esperado, a corrente para máxima potência assume praticamente o mesmo valor para todas as temperaturas consideradas, enquanto a tensão varia levemente, de acordo com os dados da Tab. (7).

Tabela 7 - Dados da máxima potência para diferentes temperaturas.

	$P_{\text{máx}}$ (W)	V_{MP} (V)	I_{MP} (A)
0 °C	296,2	34	8,6
25 °C	288,4	33,5	8,5
50 °C	280,5	32,5	8,5
75 °C	272,4	32	8,4

5.3. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA SÉRIE E PARALELO E DO FATOR DE IDEALIDADE DO DIODO

O modelo equivalente de um diodo permite que três constantes sejam alteradas para que se analise o desempenho do módulo. Neste trabalho foram feitas análises com quatro valores distintos de resistência série (0 Ω , 1 Ω , 2 Ω , 5 Ω), quatro valores distintos de resistência paralelo (10 Ω , 100 Ω , 1.000 Ω e resistência infinita) e três valores distintos do fator de idealidade do diodo.

A Figura 23 mostra o desempenho do módulo quando a resistência série varia. Nesse caso, quanto maior for o valor desse componente, é natural imaginar que maior será a potência dissipada nessa região e conseqüentemente, menor é a energia entregue a carga, fato este que pode ser comprovado pela análise do gráfico.

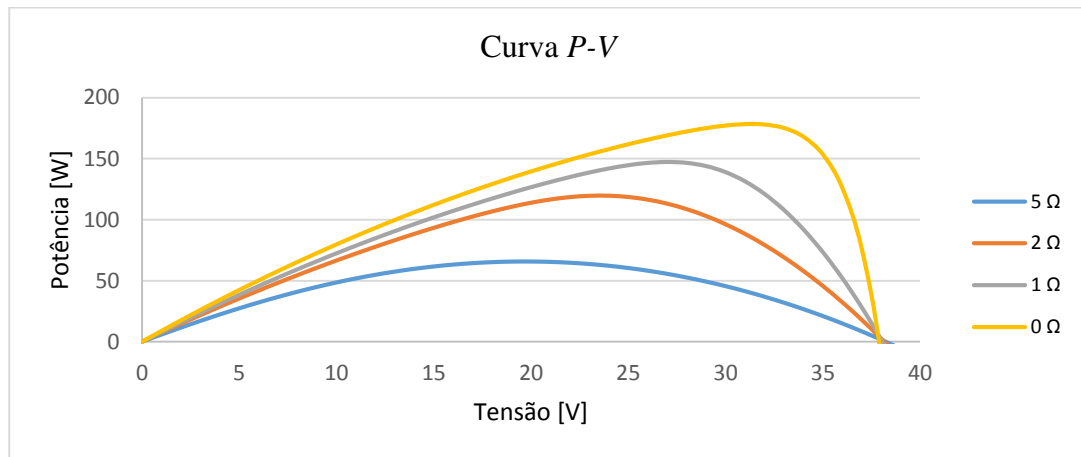


Figura 23 – Influência da resistência série na Curva $P - V$.

A Tabela 8 contém os valores de máxima potência encontrada para cada caso. Pode-se observar que nesse caso tanto a tensão quanto a corrente de máxima potência são sensíveis ao aumento da resistência série. Segundo a Eq. (7) o aumento de R_s implica na redução da corrente de saída do sistema, o que pode ser visto em relação à I_{MP} para cada situação. A tensão de saída do módulo é reduzida com o aumento da resistência série devido à queda de tensão causada por esta.

Tabela 8 - Dados da máxima potência para diferentes valores de resistência em série.

	P_M (W)	V_{MP} (V)	I_{MP} (A)
0 Ω	184,1	31	5,75
1 Ω	152,8	28	5,46
2 Ω	124,67	23	5,2
5 Ω	69,2	19	3,46

Em relação ao acréscimo no valor da resistência em paralelo, a teoria de circuitos permite concluir que quanto maior for o valor desse elemento, menor será a corrente neste ramo e, portanto, maior a corrente na saída e, conseqüentemente, maior potência de saída, como pode ser visto na Fig. (24).

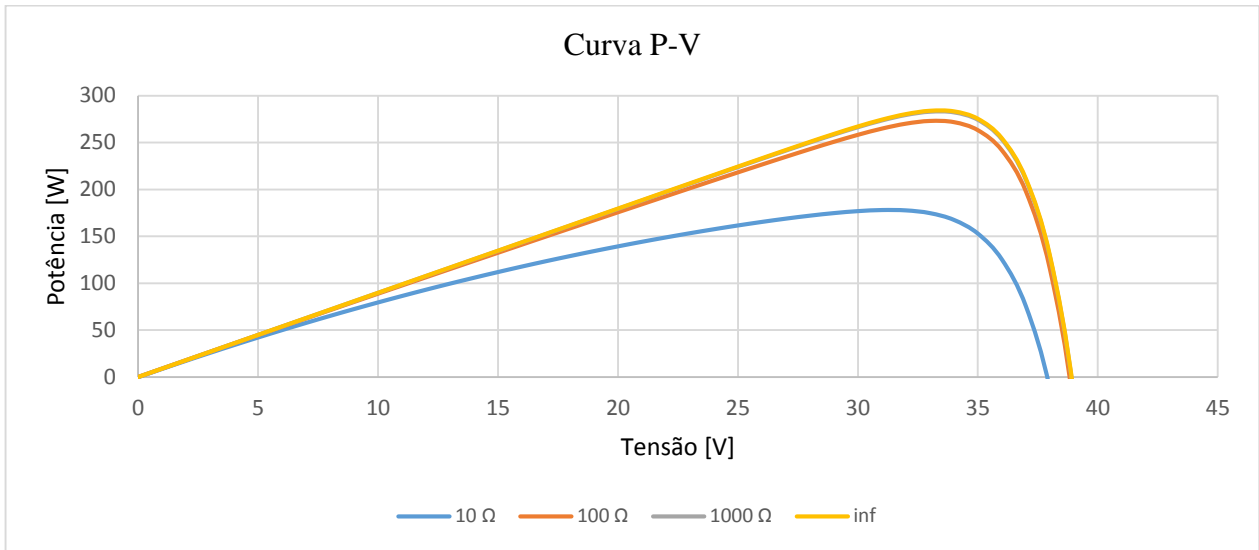


Figura 24 - Influência da resistência paralelo na Curva $P - V$.

Em relação aos valores obtidos para máxima potência e seus respectivos valores de tensão e corrente, a Tab. (9) permite assumir que a partir de um determinado valor de resistência paralelo, o comportamento do sistema será o mesmo independentemente do valor de R_p . Isto pode ser visto quando se comparam os valores de 100 Ω , 1000 Ω e resistência infinita. A V_{MP} é a mesma, a corrente varia muito pouco e a potência tende a se estabilizar, portanto é interessante que esse componente assuma um valor elevado para o melhor desempenho do módulo.

Tabela 9 - Dados da máxima potência para diferentes valores de resistência em paralelo.

	P_M (W)	V_{MP} (V)	I_{MP} (A)
10 Ω	184	31	5,75
100 Ω	281,2	33	8,3
1000 Ω	291,3	33	8,6
Inf	292,4	33	8,6

O fator de idealidade do diodo é uma constante que se faz presente na modelagem matemática no componente exponencial da corrente (ver Eq. (7)). A variação nesse valor se relaciona com o joelho da curva $I - V$, sendo que para valores menores, o decréscimo da corrente em relação à tensão ocorre com uma maior taxa. Geralmente, os valores adotados para esta

constante no modelo de um diodo variam entre 1 e 2. Foram propostas três situações e pode-se observar no gráfico da Fig. (25) a diferença no joelho da curva em cada situação.

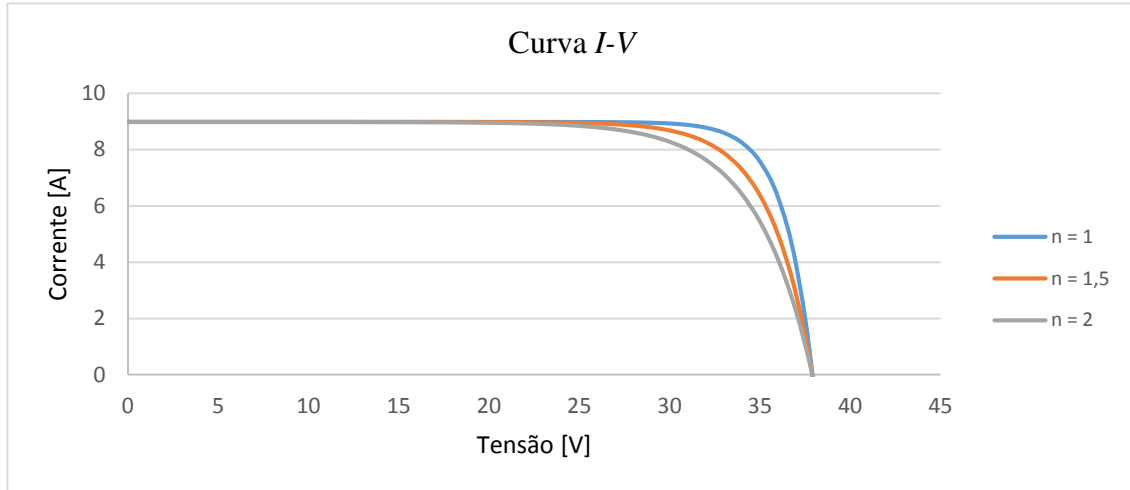


Figura 25 - Influência do fator de idealidade na Curva $I - V$.

A informação contida na Tab. (10) indica também que se obtém melhor desempenho em termos de potência quando o menor fator de idealidade é escolhido.

Tabela 10 – Dados da máxima potência para diferentes valores do fator de idealidade do diodo.

	P_M (W)	V_{MP} (V)	I_{MP} (A)
n = 1	300,8	34	8,6
n = 1,5	281	33	8,3
n = 2	264,9	31	8,3

Com essas análises feitas, é possível determinar o comportamento do modulo fotovoltaico e o capítulo seguinte apresenta as conclusões parciais obtidas nessa primeira etapa do trabalho.

6. CONCLUSÕES PARCIAIS

A proposta inicial desse trabalho era caracterizar um módulo fotovoltaico para posteriormente aplicar técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência. Inicialmente foi construído o cenário do uso da energia fotovoltaica, onde foi possível observar o crescimento dessa fonte em escala global e a conseqüente necessidade de estudos nessa área, especialmente no que diz respeito ao aumento da eficiência da geração. Também foi dada uma breve introdução histórica, na qual foram abordados momentos importantes no desenvolvimento dessa tecnologia. O funcionamento da célula recebeu maior atenção, pois o comportamento e desempenho do módulo, bem como a modelagem matemática do mesmo são melhor compreendidos quando os conceitos físicos e químicos que ocorrem na célula fotovoltaica são bem esclarecidos. Além disso, o bom entendimento do funcionamento do módulo sob diferentes condições de operação permitiu que os resultados obtidos fossem melhor avaliados.

O trabalho também abordou o tema de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência, explicando o conceito envolvido em quatro técnicas. Destas, duas são de controle indireto, método da corrente constante e método da tensão constante, e duas de controle direto, Perturbe e Observe e a técnica da Condutância Incremental. Estas últimas mais precisas e amplamente utilizadas comercialmente.

A modelagem matemática considerou o modelo de 1 diodo e as equações que regem o comportamento desse sistema foram descritas. Observando as equações envolvidas e tendo como base as referências bibliográficas utilizadas nesse trabalho, foi decidido que seriam feitas análises para que se observasse a influência da irradiação e temperatura, resistências série, paralelo e o fator de idealidade do diodo na máxima potência cedida pelo módulo. Cada uma dessas análises teve o propósito de caracterizar o comportamento do módulo quando submetido à determinada situação.

A variação da irradiação tem influência direta no valor da foto-corrente, portanto uma maior irradiação resulta em uma maior foto-corrente e, conseqüentemente, uma maior corrente de saída do módulo. Isto pôde ser visto nos gráficos apresentados, que indicaram que quanto menor a irradiação a qual o sistema é submetido, menor é a máxima potência gerada. Ainda considerando a irradiação, é possível perceber que a corrente é bastante afetada a cada análise, sendo portanto mais sensível à variação de irradiação. Em relação ao acréscimo da temperatura, tanto a foto-corrente, quanto a corrente de saturação reversa do diodo são variadas. Nesse tipo de análise, foi possível perceber que o painel tem melhor desempenho quando em menores temperaturas e a

tensão é mais sensível à variação de temperatura do que a corrente. Para a análise de diferentes valores de resistência série, como previsto por teoria, quanto maior for este valor, menor será a potência entregue pelo sistema e o contrário ocorre (maior potência entregue) quando a resistência em paralelo é muito alta, pois quanto mais elevado for o valor deste componente, menor será a corrente fluindo pelo ramo de R_p . Em relação ao fator de idealidade do diodo, a redução no valor dessa constante implica no aumento de potência extraída do sistema.

A determinação do comportamento de um módulo fotovoltaico quando submetido a diferentes condições é importante no momento de rastreamento da máxima potência pois permite que o algoritmo haja mais precisamente. Como visto previamente, as curvas $I-V$ e $P-V$ do sistema são de extrema importância na caracterização do mesmo e determinação do melhor ponto de operação do módulo. A conclusão dessa etapa inicial de observação e a modelagem matemática aqui contida permitirão a melhor implementação dos algoritmos de controle estudados.

O desenvolvimento desse trabalho se deu de forma favorável. Os resultados encontrados com a modelagem matemática vão de encontro ao que é estabelecido em teoria certamente serão facilitadores para a conclusão total do trabalho.

7. PRÓXIMAS ETAPAS

As etapas seguintes envolvem a aplicação dos conceitos discutidos aqui com a implementação de algoritmos de rastreamento para que seja feita uma discussão a respeito da eficiência de cada método e um estudo da viabilidade de cada um.

Também se propõe que cada método seja implementado no ambiente de simulação Simulink, com a construção de diagramas de blocos que executem a função de controle proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações. Editora Érica, 1º edição, São Paulo, 2012.
- [2] Balanço Energético Nacional 2013.
- [3] Review of the Maximum Power Point Tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. V. Salas, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro (2006).
- [4] Vallêra, A. M., Brito, M. C. Meio século de história fotovoltaica. Revista Gazeta de Física, Lisboa, v. 29, fascículos 1 e 2, p. 10, janeiro 2006.
- [5] Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira, Junho de 2012.
- [6] Renewables 2014 – Global Status Report. REN 21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- [7] Banco de Informações de Geração (BIG). Acesso em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Visualizado: 14/10/2014.
- [8] Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012. ANEEL, Abril, 2012.
- [9] Monteiro, J. M. B., Aplicações de Energia Solar em Meio Urbano. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Dissertação de Mestrado. Janeiro, 2005.
- [10] Liu, Y., Ren, Q., Su, Z., Chu, B., Li, W., Wu, S., Jin, F., Zhao, B., Yan, X., Wang, J., Fan, D., Zhang, F., The working mechanism of organic photovoltaic cell by using copper phthalocyanine as exciton blocking layer. Organic Electronics, Junho, 2012.
- [11] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Acesso em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Visualizado: 18/10/2014.
- [12] Chu, C. C., Chen, C. L., Robust Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Cells: A Sliding Mode Control Approach. Science Direct, Março, 2009.

[13] Chiu, C. S., Ouyang, Y. L., Ku, C. Y., Terminal Sliding Mode Control for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Power Generation Systems. Science Direct, Agosto, 2012.

[14] Salas, V., Olías, E., Barrado, A., Lázaro, A., Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand Alone Photovoltaic Systems. Solar Energy Materials & Solar Cells, Janeiro, 2006.

[15] Seguel, J. L., Junior, S. I. S., Donoso-Garcia, P. F., Morais, L. M. F., Cortizo, P. C., Mendes, M. A. S., Methodology for the design of a stand-alone photovoltaic power supply. Ingeniare – Revista Chilena de Ingeniería. Vol. 21, nº 3, 2013, p. 380 – 393.

[16] Seguel, J. L., Projeto de um Sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Dissertação de Mestrado. Agosto, 2009.

[17] Tsykunov, Y. Y., A Low-Power Voltage Inverter. Elektrotehnika - Russian Electrical Engineering, 2013, Vol. 84, Nº 8, pp. 413 – 417.

[18] Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F., Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

[19] Reisi, A. R., Moradi, M. H., Jamasb, S., Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, Vol. 19, pp. 433 – 443.

[20] Hohm, D. P., Ropp, M. E., Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2003, Vol. 11, pp. 47 – 62.

[21] Zhou, S., Kang, L., Sun, J., Guo, G., Cheng, B., Cao, B., Tang, Y., A Novel Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic System. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2010, 8(6), pp. 1364 – 1371.

[22] Seguel, J. L., Junior, S. I. S., Garcia, P. D., Morais, L. F., Cortizo, P., Mendes, M. S., Comparison of MPPT Approaches in Autonomous Photovoltaic Energy Supply System Using DSP. IEEE, 2010.

[23] Bühler, A. J., Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos a Partir de Ensaios de Curvas Características sem Iluminação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado, 2007.

[24] Possharp – The Source For Renewables. Acesso em:
<http://www.posharp.com/Default.aspx>. Visualizado: 03/11/2014.