



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

SÂMYA LORENA DE MEDEIROS CONFESSOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CONTROLADORES MPPT
APLICADOS A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

MOSSORÓ – RN

2014

SÂMYA LORENA DE MEDEIROS CONFESSOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CONTROLADORES MPPT
APLICADOS A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Elmer Rolando Llanos Villarreal –
UFERSA

MOSSORÓ – RN

2014

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

C748a Confessor, Sâmya Lorena de Medeiros

Análise comparativa de controladores MPPT aplicados a um sistema fotovoltaico. / Sâmya Lorena de Medeiros Confessor. -- Mossoró, 2014.
71f.: il.

Orientador: Prof. Dr.Elmer Rolandro Llanos Villarreal

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Sistema fotovoltaico. 2.Lógica fuzzy. 3.MPPT. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /886-14

CDD: 621.47

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa
CRB-15/120

SÂMIA LORENA DE MEDEIROS CONFESSOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CONTROLADORES MPPT
APLICADOS A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

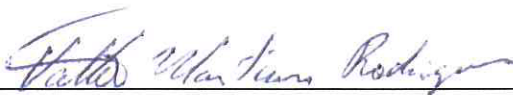
APROVADA EM: 20 / 11 / 2014.



Prof. Dr. Elmer Rolando Llanos Villarreal – UFERSA
Presidente



Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto – UFERSA
Primeiro Membro



Prof. Dr. Walter Martins Rodrigues – UFERSA
Segundo Membro



Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto – IFRN
Terceiro Membro

Mossoró, 20 de novembro de 2014

DEDICATÓRIA

À Maria Dalva (*in memoriam*), minha avó que esteve presente em todos os momentos de minha vida, me aconselhando, me inspirando e me enchendo de orgulho. Um exemplo de pessoa a ser seguido e que estará sempre ao meu lado e em meu coração.

Aos meus pais, Manoel de Oliveira e Vânia Medeiros, e minha irmã, Suênya Monique, por todo o incentivo, dedicação, amor e carinho dados em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, e por sempre ter me iluminado a cada dia em busca dos meus objetivos.

À toda minha família, especialmente meus pais e minha irmã pelo apoio, carinho, dedicação que são a base primordial em uma família. Além disso, pela educação e apoio em meus estudos que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado Dorgival Júnior, por toda dedicação no desenvolvimento do trabalho e por todo apoio e carinho.

À todos os meus amigos, em especial aos que o PPGSCA me deu a oportunidade de conhecer: Sameque, Livia e Tayara.

Ao PPGSCA pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Professor Dr. Elmer Villarreal pela orientação, dedicação e oportunidade dada nesse trabalho que tanto representa em minha vida acadêmica e profissional.

À banca examinadora presente, por contribuir para o aperfeiçoamento do meu trabalho.

EPÍGRAFE

“A satisfação que nosso trabalho nos proporciona é
sinal de que soubemos escolhê-lo.”

(Clarice Lispector)

RESUMO

A utilização de painéis solares fotovoltaicos na geração de energia elétrica é algo que está se tornando cada vez mais comum, tanto em sistemas de grande porte, quanto em sistemas autônomos de baixo consumo de energia. Neste sentido, objetivando o máximo aproveitamento da energia gerada, o painel deve operar sempre no ponto de máxima potência(MPP). O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre duas técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência MPPT (*Maximum Power Point Tracking*): o método tradicional Perturbação e Observação (P&O) e o método através da Lógica *Fuzzy*. O sistema fotovoltaico foi modelado no MATLAB/Simulink® de forma a representar a curva característica V-I do módulo PV, o qual baseia-se nos dados disponíveis nos catálogos de painéis fotovoltaicos comerciais. A partir dos resultados da simulação foi feito o estudo comparativo entre as técnicas de controle, que permitiram concluir que o controlador utilizando *Fuzzy* apresentou melhor desempenho e eficiência em se manter no MPP do que o controle baseado na técnica P&O.

Palavras-Chave: Lógica *Fuzzy*. MPPT. Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

The use of solar panels to generate electricity is something that is becoming more common comes in both large systems, as in autonomous systems with low power consumption. So that there is maximum utilization of energy generated, the panel must always operate at maximum power point (MPP). Based on this, this paper aim to perform a comparative study of two techniques for tracking the maximum power point MPPT (Maximum Power Point Tracking): the traditional method Perturbation and Observation (P&O) and the method by Fuzzy Logic. The photovoltaic system was modeled in MATLAB/Simulink® to represent the VI characteristic curve of the PV module, which is based on data available in the catalogs of commercial photovoltaic panels. From the results of the simulation study comparing control techniques, which showed that the fuzzy controller using the best performance and efficiency in keeping the MPP than the control technique based on the P&O was done.

Keywords: Fuzzy Logic. MPPT. Photovoltaic System.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.Características elétricas do módulo KC85T	26
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de uma célula fotovoltaica de silício	20
Figura 2. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica: (a) modelo ideal, (b) modelo de um diodo, (c) modelo de dois diodos	22
Figura 3. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo).....	23
Figura 4. Exemplos de módulos fotovoltaicos	25
Figura 5. Curvas características V-I do módulo fotovoltaico KC85T (a) Irradiação constante (1 kW/m ²) (b) Temperatura constante (25 °C)	27
Figura 6. Influência da temperatura ambiente nas curvas características do módulo KC85T (a) curva V-I, (b) curva V-P	28
Figura 7. Influência da irradiação nas curvas características do módulo KC85T (a) curva V- I, (b) curva V-P	29
Figura 8. Topologias básicas dos conversores CC-CC (a) Conversor <i>Buck</i> , (b) Conversor <i>Boost</i> e (c) Conversor <i>Buck-Boost</i>	32
Figura 9. Esquema de um PWM	33
Figura 10. Função de pertinência para a variável classe social.....	35
Figura 11. Função de pertinência para a variável massa corporal	36
Figura 12. Fluxograma da Técnica Perturbação e Observação (P&O)	39
Figura 13. Modelo do método através da Lógica <i>Fuzzy</i>	40
Figura 14. Bloco referente à conversão da temperatura de operação da célula fotovoltaica	42
Figura 15. Subsistema referente ao bloco "Conversão da temperatura"	42
Figura 16. Bloco referente à fotocorrente	43
Figura 17. Subsistema referente ao bloco "Fotocorrente"	43
Figura 18. Bloco referente à corrente de saturação reversa	44
Figura 19. Subsistema referente ao bloco "Corrente de saturação reversa"	44
Figura 20. Bloco referente à corrente de saturação	45
Figura 21. Subsistema referente ao bloco " Corrente de saturação"	45
Figura 22. Bloco referente à multiplicação das variáveis N_s , k , A e T_{ak}	46
Figura 23. Subsistema referente ao bloco "Multiplicação entre as variáveis $N_s A k T_{ak}$ "	46
Figura 24. Bloco referente à corrente de saída do módulo fotovoltaico	47
Figura 25. Subsistema referente ao bloco "Corrente de saída do módulo PV"	47
Figura 26. Bloco referente ao módulo fotovoltaico	48
Figura 27. Subsistema referente ao bloco " Módulo PV"	49

Figura 28. Diagrama de blocos referente ao Método P&O	50
Figura 29. Subsistema referente ao bloco "MPPT P&O"	51
Figura 30. Curva característica V-P do arranjo fotovoltaico	52
Figura 31. Funções de pertinência do método <i>Fuzzy</i>	53
Figura 32. Tabela da base de regras para MPPT <i>Fuzzy</i>	54
Figura 33. Esquema do bloco de controle Lógica <i>Fuzzy</i>	54
Figura 34. Banco de baterias implementado no <i>Simulink</i>	55
Figura 35. Topologia do sistema fotovoltaico: painéis fotovoltaicos em série e baterias em série	56
Figura 36. Modelo do sistema simulado	57
Figura 37. Curvas características V-P para o arranjo fotovoltaico para diferentes valores de irradiação e temperatura	58
Figura 38. Simulação do MPPT através do método P&O (a) Irradiância solar, (b) Temperatura ambiente	59
Figura 39. Potência do arranjo fotovoltaico através do método P&O	60
Figura 40. Simulação do MPPT através do método P&O (a) Irradiância solar, (b) Temperatura ambiente	61
Figura 41. Potência do arranjo fotovoltaico através da Lógica <i>Fuzzy</i>	62

NOMENCLATURA

Letras Latinas

I – Corrente de carga

I_s – Corrente da fonte

I_d – corrente do diodo

I_o – corrente de saturação

V – Tensão

K – constante de Boltzmann

T – temperatura em kelvin

q – carga do elétron

R_s – resistência série

R_{sh} – resistência shunt

°C – grau celsius

I_{sc} – corrente de curto-circuito

V_{oc} – tensão de circuito aberto

P_m – potência máxima

I_{mp} – Corrente máxima

V_{mp} – tensão máxima

D – *duty cycle*

SOC – estado de carga

eV – elétron volt

Abreviações

CA– Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CV – *Constant Voltage*

IndCond –*Incremental Conductance*

Mp – Número de módulos fotovoltaicos em paralelo

MCC – Modo de condução contínua

MDC – Modo de condução descontínua

MIMO – *Multiple Input Multiple Output*

MISO – *Multiple Input Single Output*

MPP – Ponto de potência máxima – *Maximum Power Point*

MPPT – Rastreamento do ponto de potência máxima (*Maximum Power Point Tracking*)

Ms – Número de módulos fotovoltaicos em série

NOCT – Temperatura normal de operação da célula (*Normal Operating Cell Temperature*)

Np – Número de células fotovoltaicas paralelo

Ns – Número de células fotovoltaicas em série

P&O – *Perturbation and Observation*

PV – Fotovoltaico (*Photovoltaic*)

PWM – Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)

STC – Condições de teste padrão (*Standard Test Conditions*)

V-I –Tensão - Corrente

V-P –Tensão - Potência

Siglas

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo

Brito

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	17
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivos Específicos	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	19
2.1.1. Tipos de células fotovoltaicas	20
2.1.1.1. Silício monocristalino	20
2.1.1.2. Silício multicristalino	21
2.1.1.3. Silício amorfo	21
2.1.1.4. Outras classificações	21
2.1.2. Modelagem de uma célula fotovoltaica	22
2.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	24
2.2.1. Modelo de um módulo fotovoltaico	25
2.2.2. Curva característica de um módulo fotovoltaico	25
2.2.3. Ponto de máxima potência	27
2.2.4. Fatores que influenciam as características elétricas dos módulos	27
2.3. ARRANJOS FOTOVOLTAICOS	30
2.4. CONVERSORES ESTÁTICOS	31
2.4.1. Conversores CC-CC	32
2.5. BANCO DE BATERIAS	33
2.6. LÓGICA FUZZY	34
2.6.1. Conjuntos nebulosos	34
2.6.2. Variáveis linguísticas	35
2.6.3. Funções de pertinência	36
2.6.4. Base de regras	37
2.7. TÉCNICAS DE RASTREAMENTO MPPT	37
2.7.1. Técnica Perturbação e Observação (P&O)	38
2.7.2. Técnica através da Lógica Fuzzy	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. MODELAGEM DO PAINEL FOTOVOLTAICO	41

3.2.	MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC	50
3.3.	MÉTODO MPPT PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O).....	50
3.4.	MÉTODO MPPT ATRAVÉS DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	51
3.5.	MODELAGEM DO BANCO DE BATERIAS.....	54
4.	RESULTADO DA SIMULAÇÃO	56
4.1.	MÉTODO MPPT PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O).....	58
4.2.	MÉTODO MPPT ATRAVÉS DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	60
5.	CONCLUSÕES	63
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS		65
ANEXO I- DATA-SHEET DO PAINEL SOLAR KC85T DO FABRICANTE		
KYOCERA		69

1. INTRODUÇÃO

No contexto da elevada demanda de energia do mundo e das consequências em virtude das mudanças climáticas, é importante a diversificação da matriz energética, e que as fontes renováveis tenham uma representação considerável. O constante desenvolvimento industrial mundial e o aumento na utilização de equipamentos elétricos numa diversidade de atividades humanas fizeram com que a demanda por energia elétrica aumentasse em forma exponencial nas últimas décadas. Este aumento na demanda não foi acompanhado da mesma taxa de investimentos no setor de geração de energia elétrica, o que provocou que alguns países tenham experimentado muitos problemas no seu sistema energético (SEGUEL,2009). Define-se energia renovável como aquela que é oriunda de recursos naturais, e que possui a característica de ser reabastecida e limpa. Esses recursos naturais são o sol, o vento, os recursos hídricos e oceânicos, os quais fornecem energia sustentável para suprir as necessidades mundiais.

As novas políticas adotadas pelas empresas, visando atender a demanda social por respeito às questões ambientais, são regidas pelas fontes renováveis. Não é somente a sociedade que impõe esse respeito com o meio ambiente. A preservação do ecossistema aparece comumente nas pautas empresariais, de modo a atender as exigências da sociedade de redução da emissão de poluentes, reciclagem, e utilização de energias renováveis. O governo criou leis que obrigam as empresas a terem um planejamento ambiental.

As energias renováveis oferecem a vantagem, em relação as não renováveis, de garantir um potencial energético para as gerações futuras. Devido à intensa demanda por combustíveis fósseis, principalmente nos países desenvolvidos, o preço desse tipo de energia tem aumentado, o que exige pesquisas em outras energias, mais limpas e renováveis.

Embora seus custos tenham caído consideravelmente nas últimas duas décadas, as energias renováveis ainda apresentam preços elevados em comparação com as não renováveis. Além disso, as energias limpas apresentam dificuldade na sua coleta e no seu armazenamento devido às variações imprevisíveis do clima.

A energia solar fotovoltaica é cada vez mais utilizada em substituição aos métodos convencionais de geração de eletricidade pois, nos dias atuais, em que os problemas ambientais se agravam e as matérias primas se esgotam, não é mais possível tolerar a utilização irracional das fontes convencionais de energia obtidas a partir do nosso meio ambiente (DEMONTI, 1998).

A conversão solar fotovoltaica é uma das formas de energia alternativa mais citada para substituir os métodos convencionais para geração de eletricidade. Entretanto, existe a

necessidade de aperfeiçoar tal sistema em geral para ser mais competitivo no mercado de energia, tornando-o tecnicamente e economicamente viável (VAZ, 2006).

No contexto nacional, tem-se que o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 64,9% da oferta interna. As fontes renováveis representam 79,3% da oferta interna de eletricidade no país, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2014). A utilização de fontes de energia limpa na matriz energética brasileira ainda é reduzida. No nordeste do país, existe uma maior diversidade na utilização das energias renováveis. É possível observar vários parques eólicos, assim como algumas usinas solares.

Neste contexto está a energia solar, a qual não é prejudicial ao meio ambiente e é renovável. Ela apresenta-se como energia do futuro pois deverá ser utilizada em regiões onde há escassez de outros tipos de energia. Em diversas regiões do Brasil ocorrem muitas secas, causando uma baixa nos níveis dos reservatórios de água e consequentemente a produção de energia devido às hidrelétricas é reduzida. No entanto, o uso consciente da energia está sendo estimulado. A criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), sendo de responsabilidade da Eletrobrás, possui consequente importância ao fiscalizar o desperdício de energia elétrica.

1.1.JUSTIFICATIVA

Dentre as fontes alternativas, destaca-se a energia solar, por ser uma fonte menos poluente, silenciosa, modular e que necessita de pouca manutenção. Além disso, possui prazos de instalação e operação muito pequenos, provoca impacto ambiental quase nulo e pode ser facilmente integrada as construções, gerando eletricidade localmente, sem a necessidade de linhas de transmissão que provocam perdas e alto impacto ambiental.

Com o passar do tempo, surgem novas técnicas de produção de energia a partir de sistemas solares fotovoltaicos. Essa produção depende, do nível de insolação incidente sobre eles. Como o recurso energético solar apresenta grande variabilidade devido à alternância de dias e noites, das estações do ano, a produção de energia apresentará uma grande variação de acordo com a insolação, ou seja, nos períodos de grande insolação haverá grande produção de energia, nos períodos de baixa insolação haverá pouca produção de energia e nos períodos sem insolação não haverá produção de energia. Dessa forma, a quantidade de energia gerada pelos painéis em

grande parte das aplicações, não coincidirá com a quantidade de energia requerida pelas cargas elétricas da instalação (MARQUES,2008).

Com base na necessidade de desenvolvimento de técnicas de controle da máxima potência do painel fotovoltaico, este trabalho apresenta uma análise comparativa entre duas técnicas de controle MPPT. Ao final do estudo, será possível constatar qual o melhor método de controle aplicado ao painel, a fim de que o mesmo opere sempre com a maior eficiência possível, ou seja, evitando que haja desperdício da energia que o painel fotovoltaico é capaz de gerar.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar comparativamente o controle da máxima potência de um sistema fotovoltaico, utilizando a técnica MPPT Perturbação e Observação (P&O) e a técnica através da Lógica *Fuzzy*.

1.2.2. Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever os principais elementos que compõem um sistema solar fotovoltaico;
- Apresentar as principais características das técnicas de controle MPPT utilizadas nesse trabalho;
- Descrever a metodologia aplicada ao caso em estudo;
- Avaliar o desempenho dos métodos de controle utilizados, averiguando qual é o mais eficiente.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados conceitos introdutórios sobre o funcionamento de uma célula solar, bem como os tipos de células solares disponíveis no mercado. Além disso será demonstrado a modelagem dos elementos que compõem o sistema fotovoltaico em estudo. O principal componente de um sistema fotovoltaico é o módulo fotovoltaico, que é composto por estruturas menores denominadas de células fotovoltaicas que são unidades geradoras de energia elétrica.

2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A energia solar é convertida em energia elétrica de corrente contínua através das células fotovoltaicas. O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica é baseado no efeito fotoelétrico. Esse efeito indica que a incidência da luz em um material metálico pode arrancar elétrons de sua superfície. Em 1887, Hertz observou em seus experimentos que a intensidade da faísca podia ser aumentada iluminando um dos polos do anel detector. O efeito foi descoberto casualmente por Hertz quando tentava comprovar, com experimentos, as ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell. Toda radiação eletromagnética é quantizada em pacotes de energia conhecidos como fótons. A luz solar é uma mistura de muitos fótons de diferentes frequências.

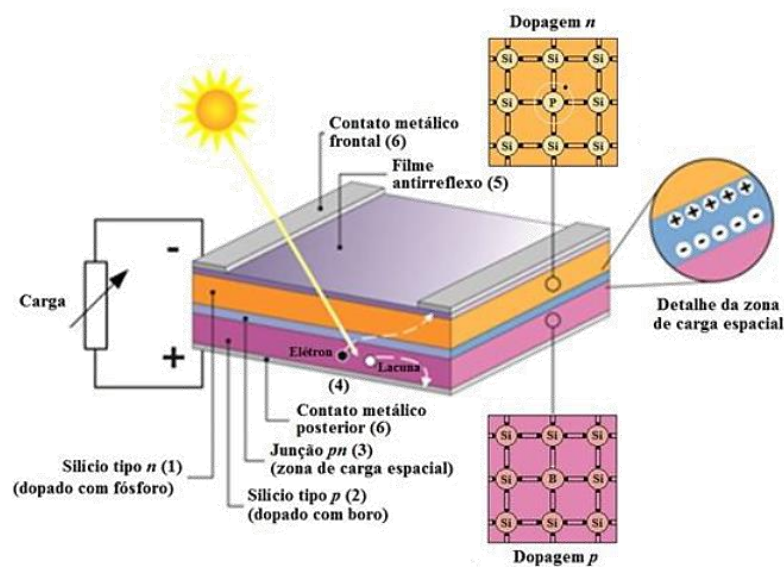
Com a finalidade de se obter elétrons livres, o material semicondutor é dopado com materiais que o deixem com excesso de átomos doadores em uma metade, tipo n , e escassez de elétrons na outra, tipo p . Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, alguns fótons são absorvidos e a energia do fóton é transferida para um elétron em um átomo da célula obrigando-o a se deslocar da sua posição inicial no material tipo n (STEVENSON, 2008), criando uma lacuna no átomo. Se os fótons tiverem energia suficiente, os elétrons serão capazes de superar o campo elétrico existente entre o material tipo p e o material tipo n (junção $p-n$) ficando livres para se mover através do material tipo p já que este tem excesso de lacunas. A lacuna feita pelo deslocamento do elétron vai atrair outro elétron de um átomo vizinho agora criando outra lacuna, que por sua vez é novamente preenchida por um elétron excitado de outro átomo. Tal processo será repetido infinitamente até que uma corrente elétrica seja estabelecida.

Quando esse processo for alcançado, as células deverão ser conectadas a um circuito externo de energia. À medida que os elétrons atravessam o circuito externo, fornecem a sua

energia como trabalho útil e retornam à célula solar. A Figura 1 ilustra o esquema de uma célula fotovoltaica de silício. Basicamente, uma célula é constituída pelas seguintes camadas:

- Contato metálico frontal - transmite a corrente elétrica.
- Filme antirreflexo - substância concebida para evitar a luz que atinge as células seja refletida de forma que a máxima energia possa ser absorvida, aumentando sua eficiência
- Contato metálico posterior - transmite a corrente elétrica.
- Semicondutor *tipo n* - fina camada de silício dopado com fósforo.
- Semicondutor *tipo p* - fina camada de silício dopado com boro.

Figura 1. Esquema de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Cresesb, 2014

2.1.1. Tipos de células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são feitas basicamente de silício. Os tipos mais conhecidos são: células de silício monocristalino, multicristalino e amorfo. A seguir são detalhadas as principais características de cada uma delas.

2.1.1.1. Silício monocristalino

A utilização de células fotovoltaicas produzidas a partir de silício com alto grau de pureza torna o painel fotovoltaico muito mais eficiente. Essa condição de alta pureza torna o

produto final com elevado valor. Segundo (KRANZL *et al.*, 2006), existe uma variação desse tipo de painel conhecido como painel de Silício Monocristalino Bifacial, o qual faz uso de células de monocristais cobertas por uma superfície refletora para melhor coletar energia que de outra forma seria desperdiçada. É por causa desse aproveitamento de energia que o painel apresenta uma eficiência superior ao do monocristalino simples. Embora essa nova tecnologia utilize coberturas de vidro nas duas faces, o custo é praticamente o mesmo das do painel simples.

2.1.1.2. Silício multicristalino

O sólido de multicristais de silício constitui as células fotovoltaicas conhecidas como células de silício multicristalino. A utilização desse tipo de arranjo promove a degradação dos cristais de silício, o que provoca uma diminuição da eficiência dessas células. Contudo, a fabricação desse produto é mais barata do que a das células de silício monocristalino. Pode-se usar substratos de baixo custo para depositar neles o material multicristalino, podendo-se assim, fabricar materiais finos e flexíveis (RAZYKOV, 2003).

2.1.1.3. Silício amorfo

As células fotovoltaicas constituídas de silício amorfo apresentam um produto final mais barato, porque demandam menos energia na sua fabricação. Embora o custo seja menor, a eficiência também é menor. Isso demanda uma célula muito maior em tamanho, para compensar a baixa eficiência, do que aquelas feitas de silício monocristalino ou multicristalino. No entanto, novas técnicas de fabricação estão sendo desenvolvidas para manter o baixo custo final do produto e aumentar a sua eficiência. (TAVARES, 2009).

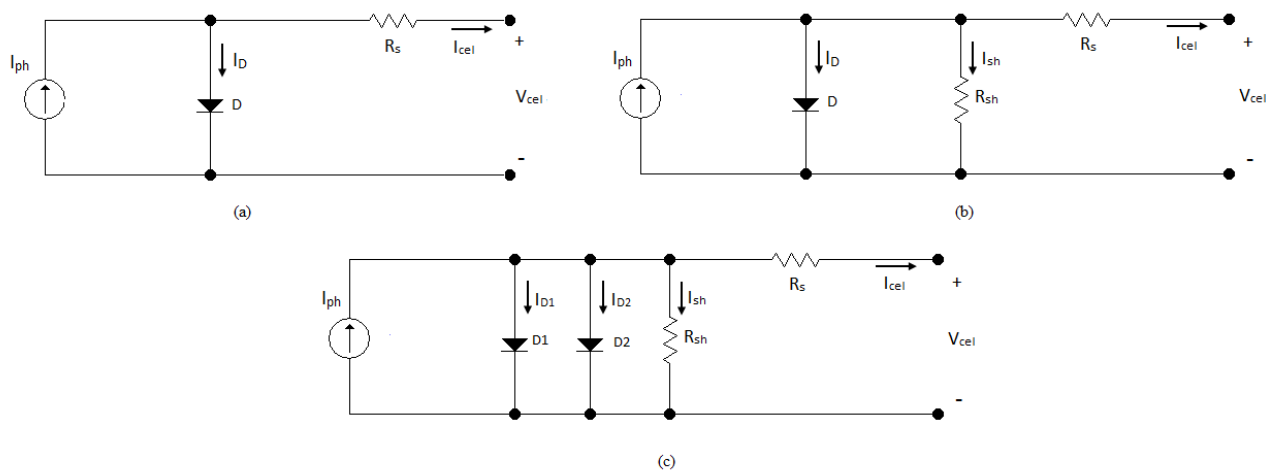
2.1.1.4. Outras classificações

Além da classificação das células fotovoltaicas por classificações de silício, elas podem ser classificadas de uma maneira mais geral pelos tipos de materiais de que são feitas. A sua composição química pode variar muito, embora a tecnologia que utilize o silício seja a mais utilizada (STEVENSON, 2008), devido à grande quantidade de silício disponível no planeta, outros materiais podem ser utilizados, tais como o Selênio, o Sulfeto de Cádmio, o Telureto de Cádmio.

2.1.2. Modelagem de uma célula fotovoltaica

A curva de tensão-corrente (V-I) é uma das principais características do painel fotovoltaico. A modelagem do painel consiste em obter a curva V-I a partir do circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica. Existem três abordagens principais a respeito dos circuitos elétricos que representam as células solares: o modelo ideal, o modelo de um diodo, e o modelo de dois diodos (FREIRE, CARVALHO, 2000) ilustrados respectivamente na Figura 2.

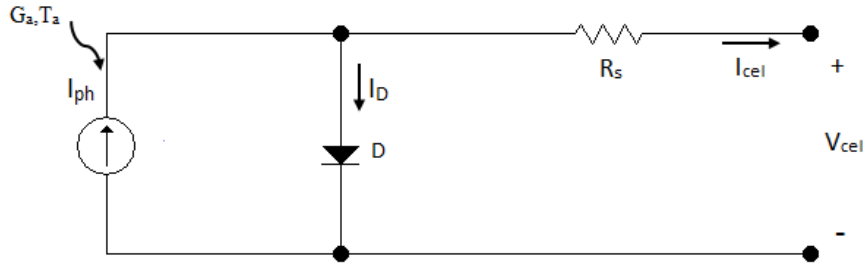
Figura 2. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica: (a) modelo ideal, (b) modelo de um diodo, (c) modelo de dois diodos



Fonte: Elaboração própria

Diversos trabalhos foram feitos a partir do modelo ideal. Alguns trabalhos utilizam um modelo com um diodo, considerando a resistência shunt (R_{sh}) desprezível. A inserção de alguns parâmetros como, por exemplo, a temperatura ambiente torna o projeto mais complexo. Em relação a essa complexidade, o modelo mais aceito é o de um diodo (modelo real), pois quando comparada a análise com o modelo ideal e com os outros, apresenta complexidade moderada. A equação característica do modelo das células fotovoltaicas é obtida a partir da aplicação das Leis de Kirchhoff para o circuito equivalente ao qual se deseja determinar as grandezas de saída (ATTOU; MASSOUM; SAIDI, 2014), (REBHI; BENATILLAH; SELAM, 2013), (ALTAS; SHARAF, 2007), (NEMA; NEMA; AGNIHOTRI, 2010), (TAKUN; KAITWANIDVILAI; JETTANASEN, 2011). No presente trabalho, será abordado o modelo de um diodo, desprezando-se a resistência shunt. A modelagem da célula fotovoltaica será obtida para o circuito conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo)



Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que a fonte de corrente produz uma fotocorrente que é diretamente proporcional à radiação solar e inversamente proporcional à temperatura de operação da célula (REKIOUA, MATAGNE, 2012). Aplicando a Lei de Kirchhoff para corrente, tem-se que:

$$I_{cel} = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

Em que

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{pv}}{AkTa} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Logo,

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{cel} + I_{cel}R_s}{AkTa} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Onde:

I_{ph} é a fotocorrente (ampères);

I_0 é a corrente de saturação do diodo (ampères);

q é a carga do elétron (coulombs);

k é a constante de Boltzmann (J/K);

A é o fator de idealidade do diodo;

Ta é a temperatura de junção da célula fotovoltaica (Kelvin);

I_D é a corrente que atravessa o diodo (ampères);

R_s é a resistência em série (ohms);

V_{cel} é a tensão de saída da célula fotovoltaica (volts).

Considerando-se o valor da fotocorrente igual ao valor da corrente de curto circuito, a corrente de saída da célula fotovoltaica será expressa por Equação 4.

$$I_{cel} = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{cel} + I_{cel} R_s}{AkT a} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Em que I_{sc} é a corrente de curto circuito da célula fotovoltaica (medida em Ampères).

Para determinar o valor da corrente de saturação reversa, considera-se a corrente na saída da célula como nula. Assim, tem-se que:

$$I_{cel} = 0 \quad (5)$$

$$V_{cel} = V_{oc} \quad (6)$$

$$I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{cel}}{AkT a} \right) - 1 \right] = 0 \quad (7)$$

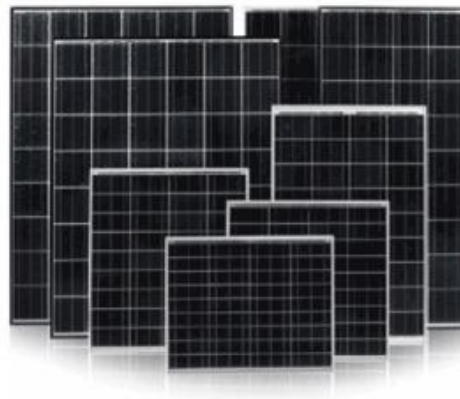
Em que V_{oc} é a tensão do circuito aberto da célula fotovoltaica (medida em volts). Fazendo as devidas manipulações matemáticas na Equação 7, pode-se obter a expressão para a corrente de saturação do diodo, dada pela Equação 8:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left[\exp \left(q \frac{V_{cel} + I_{cel} R_s}{AkT a} \right) - 1 \right]} \quad (8)$$

2.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo a norma NBR 10899, o módulo fotovoltaico (PV) é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica (CRESESB, 2014). A Figura 4 ilustra um módulo PV.

Figura 4.Exemplos de módulos fotovoltaicos



Fonte: Kyocera, 2014

A associação de n-células fotovoltaicas em um módulo gera níveis de corrente, tensão e potência adequados para diversas aplicações práticas, protegendo as células de agressões, além de isolá-las eletricamente do exterior, o que dá rigidez mecânica ao conjunto. Deve-se ter cuidado ao escolher as células que serão utilizadas na fabricação do módulo, devido a suas características elétricas. Ainda segundo Cresesb (2014), a incompatibilidade destas características leva a módulos de baixa qualidade, devido ao efeito de *mismatch* (descasamento), pelo qual as células de menor fotocorrente limitam o desempenho do conjunto e, em consequência, a eficiência global do módulo PV é reduzida.

2.2.1. Modelo de um módulo fotovoltaico

Como em um módulo PV todas as células são idênticas, então a curva V-I do módulo poderá ser determinada pela definição da curva V-I de cada célula. Assim, pode-se obter a respectiva curva do módulo multiplicando-se a tensão (V_{cel}) pelo número de linhas (N_s) e a corrente I_{cel} pelo número de colunas (N_p). Como as curvas V-I da célula e do módulo têm uma forma semelhante, o mesmo modelo é adequado para ambos. No Capítulo 3 será abordada a modelagem e simulação do módulo PV em estudo.

2.2.2. Curva característica de um módulo fotovoltaico

Em virtude da variação das condições operacionais no mundo real, os fabricantes de painéis PV precisam propor algumas condições de teste padrão (*Standart Test Conditions – STC*) a fim de realizar a classificação de um painel. Dessa forma, qualquer módulo PV deve ser

submetido às mesmas condições para se formar uma base de comparação entre os fabricantes. Esta avaliação é realizada em 1000W/m^2 de luminosidade incidente, temperatura da célula (não é temperatura ambiente) de 25°C e massa do ar de 1,5 (AM1.5G, onde G significa "global" e inclui a irradiação direta e irradiação difusa). Deve-se ressaltar ainda que estas condições de operação são raramente encontradas simultaneamente no mundo real. Para o trabalho em estudo, escolheu-se o modelo KC85T multicristalino de alta eficiência de 87W, do fabricante Kyocera, cujas características elétricas estão apresentadas na Tabela 1. No ANEXO I encontra-se o *datasheet* do módulo analisado.

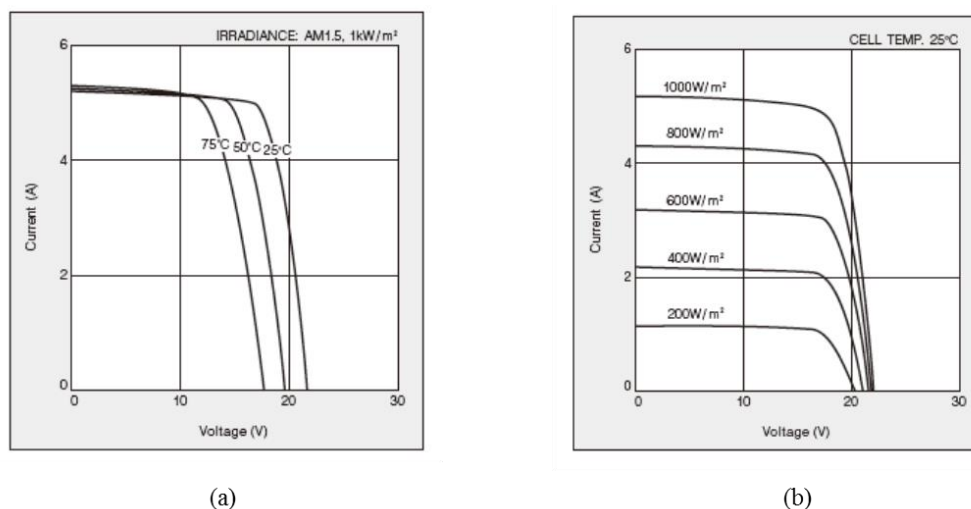
Tabela 1. Características elétricas do módulo KC85T

Características elétricas do módulo KC85T (*STC)	
Potência máxima (P _{max})	87W
Tensão na P _{max} (V _{pmax})	17,4V
Corrente na P _{max} (I _{pmax})	5,02A
Corrente de curto circuito (I _{sc})	5,34A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	21,7V
Coeficiente de temperatura de I _{sc}	0,00212A/°C
Coeficiente de temperatura de V _{oc}	-0,0821V/°C
Número de células em série (N _s)	36

Fonte: Kyocera, 2014

O modelo fotovoltaico foi implementado e simulado no software *MATLAB/Simulink*® e deverá apresentar um comportamento próximo de um painel comercial, ou seja, deverá fornecer a mesma curva característica apresentada no catálogo do fabricante desejado. Para o módulo utilizado nesse trabalho, tem-se que as curvas V-I fornecidas pela Kyocera são mostradas na Figura 5.

Figura 5. Curvas características V-I do módulo fotovoltaico KC85T (a) Irradiação constante (1 kW/m²) (b) Temperatura constante (25° C)



Fonte: Kyocera, 2014

2.2.3. Ponto de máxima potência

Módulos PV possuem um único ponto de operação, para valores instantâneos de irradiação e temperatura, em que os valores da corrente (I_{pv}) e tensão (V_{pv}), resultam em uma potência máxima. O ponto de máxima potência corresponde então, ao produto da tensão de máxima potência (V_{pmax}) e corrente de máxima potência (I_{pmax}). Os valores de máxima potência, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito são os parâmetros que especificam o módulo fotovoltaico sob dadas condições de radiação, temperatura de operação de célula e massa de ar (CRESESB, 2014).

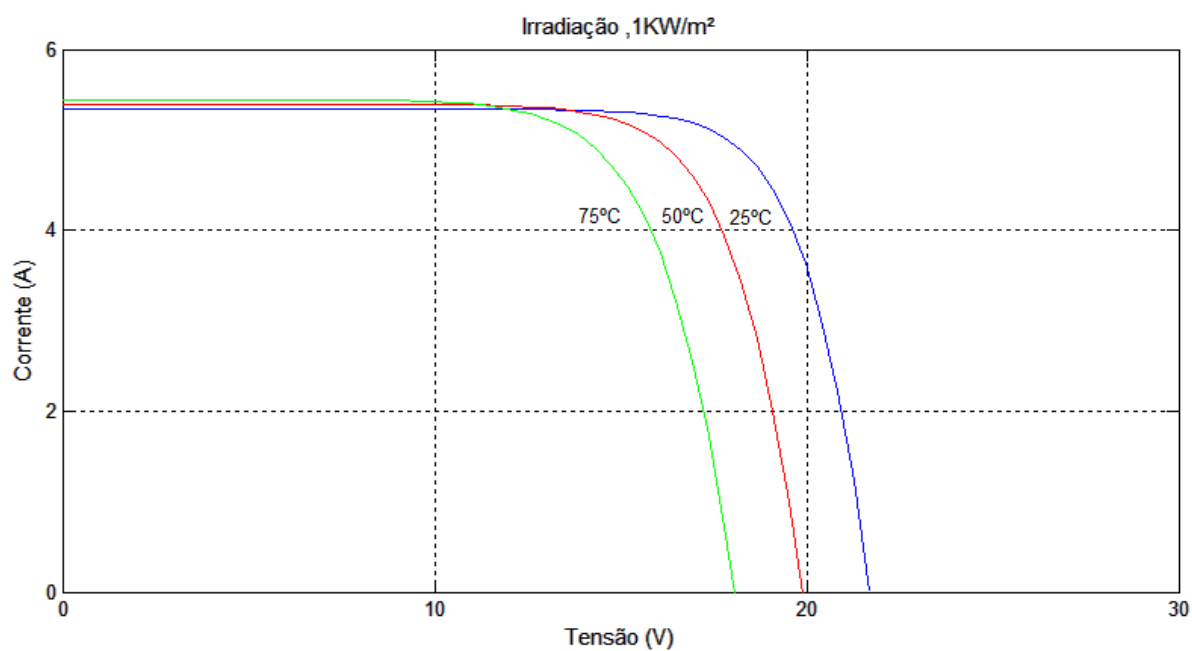
2.2.4. Fatores que influenciam as características elétricas dos módulos

Assim como ocorre com as células fotovoltaicas, o desempenho dos módulos PV é influenciado pela irradiação solar e pela temperatura das células. As células fotovoltaicas, bem como grande parte dos materiais semicondutores, operam com maior eficiência a temperaturas mais baixas. O aumento da temperatura, em geral, é o fator mais importante para a perda de desempenho de uma célula fotovoltaica. No inverno, os módulos PV geram menos energia do que no verão, em virtude de fatores como por exemplo, a existência de dias mais curtos em determinadas localidades, ao baixo ângulo de incidência de irradiação solar ou a grande cobertura de nuvens, causando o efeito de sombreamento nos painéis.

A potência de saída dos módulos PV é proporcional à intensidade da luz solar, portanto, além da passagem das nuvens, existe ainda, o movimento aparente do sol de acordo com a hora do dia que irá reduzir a potência produzida pelo sistema. Atualmente existem técnicas que determinam a melhor posição de inclinação para operação do painel fotovoltaico de acordo com o ângulo de incidência da irradiação solar (ARMSTRONG, HURLEY, 2005), mas a grande maioria das aplicações atuais ainda considera que os painéis PV são fixos em uma determinada estrutura.

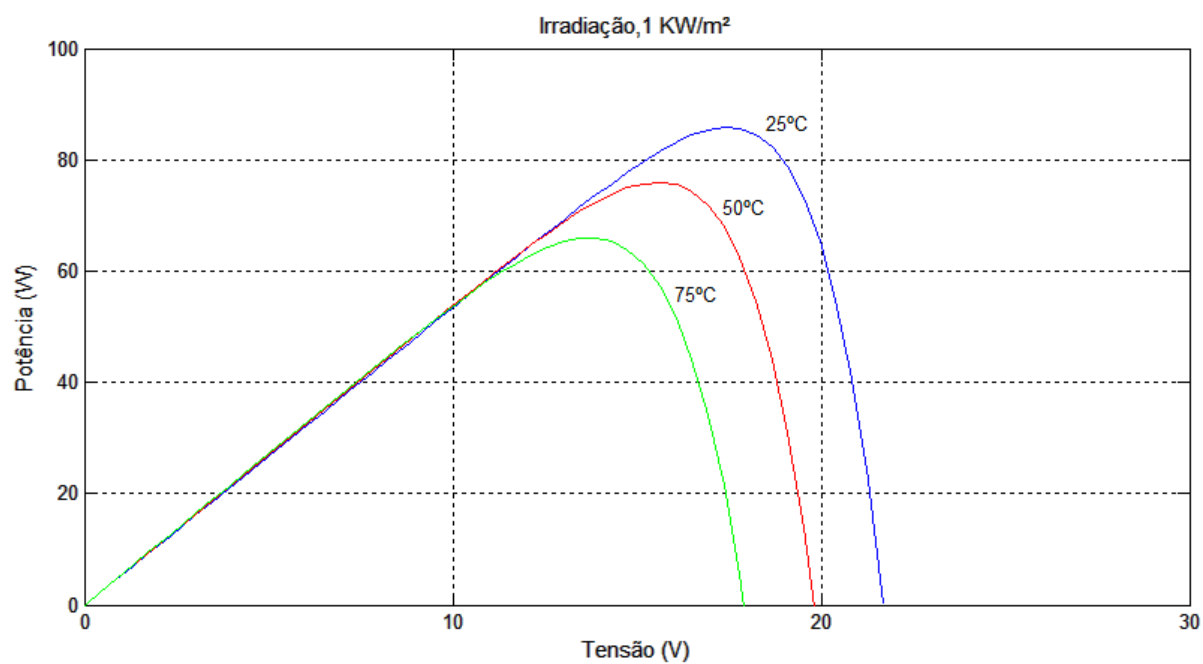
A corrente de operação do módulo fotovoltaico é diretamente proporcional à irradiação incidente sobre sua superfície. Nas Figura 6 e 7 encontram-se ilustradas as curvas características obtidas, sob a influência da temperatura e da irradiação, do módulo comercial KC85T utilizado neste trabalho.

Figura 6. Influência da temperatura ambiente nas curvas características do módulo KC85T (a) curva V-I, (b) curva V-P



(a)

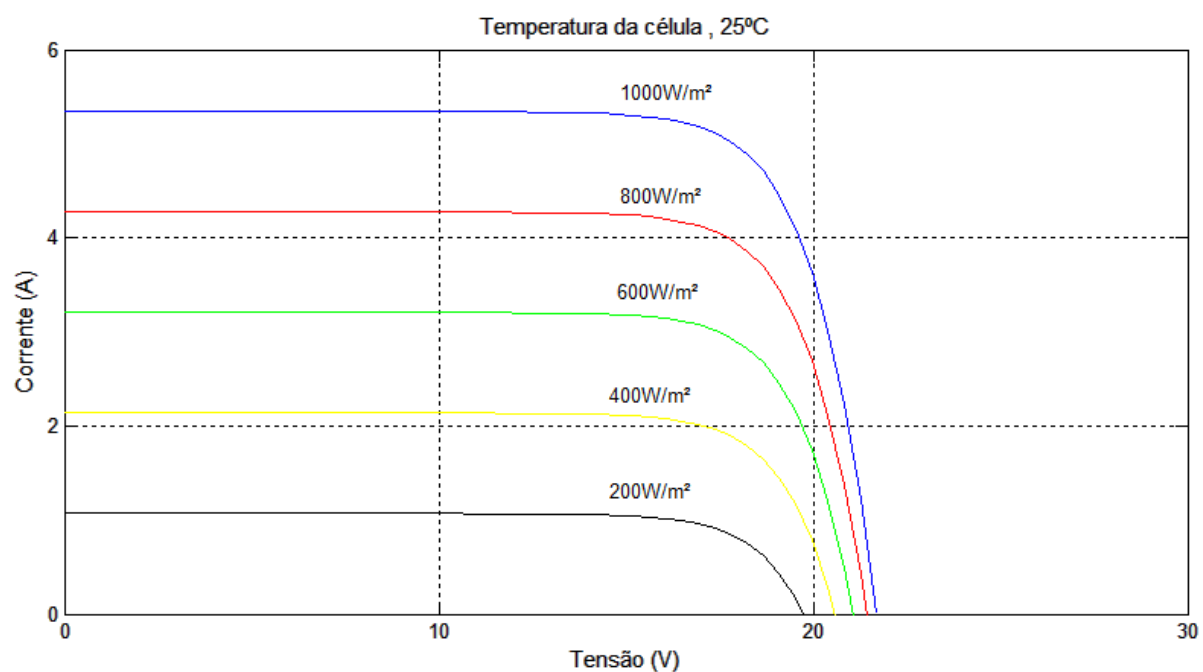
Fonte: Elaboração própria



(b)

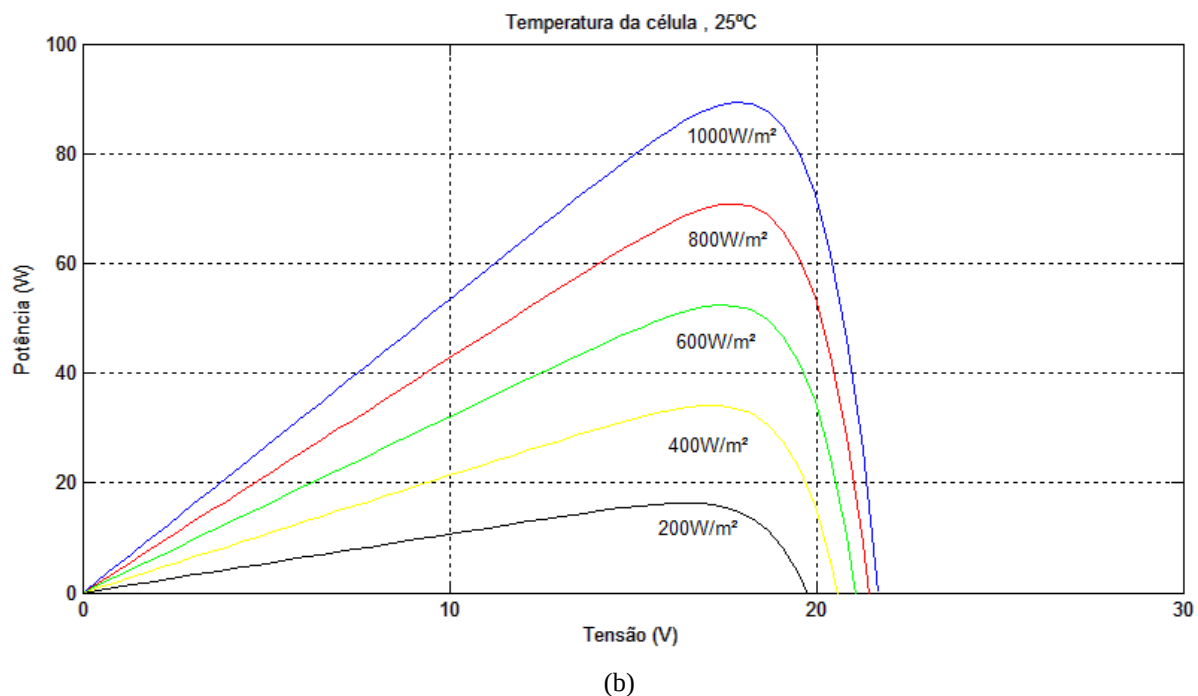
Fonte: Elaboração própria

Figura 7. Influência da irradiação nas curvas características do módulo KC85T (a) curva V- I, (b) curva V-P



(a)

Fonte: Elaboração própria



Fonte: Elaboração própria

Como pode-se observar, a temperatura exerce maior influência sobre a tensão, conforme indicam os deslocamentos na horizontal das curvas na Figura 6(a) e 6(b). Com o aumento da temperatura da célula, a tensão de circuito aberto do módulo PV apresenta uma diminuição em seus valores muito mais significativa do que a corrente gerada pelo módulo. Assim, com o aumento da temperatura, além de ocorrer um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência (MPP), ele se desloca consideravelmente para a esquerda.

Com relação ao efeito produzido pela radiação solar, pode-se observar que a corrente do módulo PV é o parâmetro mais afetado por sua variação, conforme Figura 7(a). Isso ocorre pelo fato de serem os fótons que liberam os elétrons, que contribuem para o efeito fotovoltaico na estrutura semicondutora. A tensão do circuito aberto sofre poucas alterações com a variação da intensidade luminosa. Dessa forma, tem-se que com o aumento da radiação incidente ocorre um deslocamento para cima do ponto de máxima potência.

2.3. ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Múltiplos módulos podem ser conectados para formar o chamado arranjo(*array*) fotovoltaico. Em geral, quanto maior a área de um módulo, mais eletricidade será produzida. Do ponto de vista elétrico eles também podem ser ligados em série e em paralelo para produzir

qualquer combinação de tensão e corrente (TAVARES, 2009). A curva característica V-I de um arranjo PV, é semelhante ao de um módulo e de uma célula fotovoltaica. Assim, obedece a mesma modelagem e pode ser obtida pelas Equações 9 e 10.

$$I_{arranjo} = I_{cel} \times M_p \times N_p \quad (9)$$

$$V_{arranjo} = V_{cel} \times M_s \times N_s \quad (10)$$

Em que,

M_p é o número de módulos em paralelo;

M_s é o número de módulos em série;

N_p é o número de células em paralelo;

N_s é o número de células em série.

2.4. CONVERSORES ESTÁTICOS

Nos conversores estáticos ocorre uma transformação da potência elétrica existente em alguma outra que seja aproveitável. Dessa forma, eles são produzidos para variar a tensão ou a corrente, tanto na intensidade quanto na forma, podendo inclusive transformar a corrente contínua em alternada, e vice-versa, o mesmo podendo ocorrer com a tensão. Esse processo ocorre devido a abertura e fechamento das suas chaves semicondutoras (SEGUEL,2009).

Esses conversores possuem dois modos de funcionamento, podendo operar a partir da tensão ou da corrente. A variável de controle quando operando no modo tensão é a tensão de saída, e o conversor funciona como uma fonte de tensão. Quando funciona no modo corrente, a variável de controle passa a ser a corrente de saída. Em sistemas fotovoltaicos, utilizam-se, comumente, dois tipos de conversores estáticos: os conversores CC – CC e os conversores CC – CA. Nesse trabalho, será abordado apenas as descrições dos conversores CC – CC.

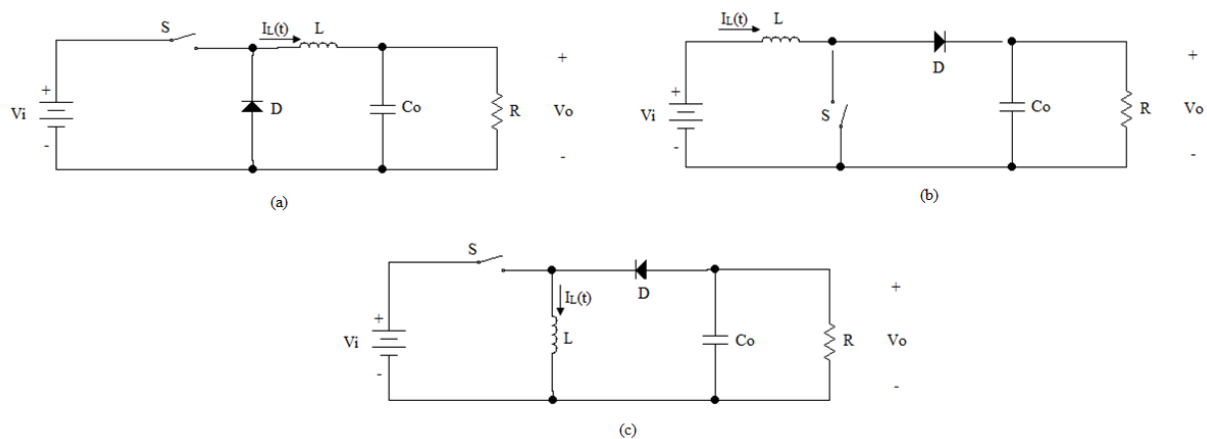
2.4.1. Conversores CC-CC

Os conversores que funcionam com essa descrição são aqueles que absorvem uma informação na forma de tensão ou de corrente e convertem para um outro valor desses parâmetros. Eles se apresentam de algumas formas:

- Conversor abaixador de tensão (conversor *Buck*);
- Conversor elevador de tensão (conversor *Boost*);
- Conversor abaixador-elevador (conversor *Buck-Boost*).

Nas três topologias informadas anteriormente, conforme ilustrado na Figura 8, S representa a chave estática de potência, L representa o indutor, C o capacitor filtrando a saída, D o elemento de passagem em sentido único da corrente, $I_L(t)$ é a corrente sobre o indutor, V_i é a tensão de entrada e V_o a tensão de saída sobre a resistência R.

Figura 8. Topologias básicas dos conversores CC-CC (a) Conversor *Buck*, (b) Conversor *Boost* e (c) Conversor *Buck-Boost*



Fonte: Elaboração própria

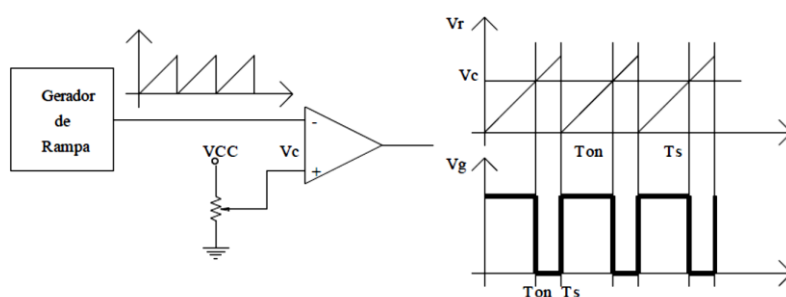
Os conversores CC-CC possuem dois modos de operação conforme o valor da corrente $I_L(t)$: o modo de condução contínua (MCC), em que a corrente $I_L(t)$ é sempre maior que zero durante um período de chaveamento e o modo de condução descontínua (MCD) em que a corrente $I_L(t)$ é zero por alguns instantes do período de chaveamento.

Em sistemas de geração solar fotovoltaica, os conversores são utilizados para fazer a ligação dos painéis às cargas de corrente contínua. Além disso, eles possuem duas funções no

sistema PV: uma é se adequar ao nível de tensão gerado nos terminais do painel à tensão no barramento CC, o que possibilita padronizar a tensão dos equipamentos conectados ao barramento, a outra é seguir o ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos.

No presente trabalho, considera-se que os pulsos de comando da chave são gerados com frequência de chaveamento fixa. Uma forma de gerar esses pulsos é através da modulação por largura de pulso (*Pulse-Width Modulation – PWM*) baseada num sinal de portadora do tipo rampa, ou dente-de-serra, com frequência fixa. A Figura 9 ilustra de forma simplificada o controle PWM.

Figura 9. Esquema de um PWM



Fonte: Tavares, 2009

O princípio de funcionamento do PWM baseia-se no seguinte esquema: o sinal portadora dente-de-serra (ou rampa) é comparado com o sinal de referência (V_c) por um modulador. A largura do pulso na saída do modulador varia de acordo com a amplitude do sinal de referência em comparação com o sinal da portadora. Dessa forma, obtém-se a modulação por largura de pulso, em que o *duty cycle* é o fator que determina a variação da amplitude do sinal de referência. Variando-se a largura do pulso, pode-se controlar a corrente que chega na carga e, portanto, a potência média aplicada a esta carga. (RASHID, 1999).

2.5. BANCO DE BATERIAS

Em sistemas fotovoltaicos isolados, o uso de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente (à noite ou em dias chuvosos ou nublados, com baixos níveis de irradiância solar). Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em outros momentos para atender a demanda (CRESESB, 2014).

Entre esses dispositivos de armazenamento, existe a bateria, que em sistemas fotovoltaicos isolados é o mais utilizado, uma vez que é uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia elétrica.

Um banco de bateria é um arranjo de elementos de baterias que permite configurações de grandes autonomias de energia CC. A dimensão física desses arranjos de baterias é proporcional à necessidade de autonomia de energia do sistema (TAVARES, 2009). Existem inúmeros tipos de baterias no mercado, sendo as mais conhecidas as de chumbo-ácido e as de níquel-cádmio. Embora as baterias de níquel-cádmio apresentem vantagens como uma maior durabilidade, as de chumbo ácido possuem um custo muito menor. Baseado nessa característica, as baterias de chumbo-ácido serão as analisadas neste trabalho.

2.6.LÓGICA FUZZY

Os princípios de lógica *fuzzy* foram desenvolvidos primeiramente por Jan Lukasiewicz (1878-1956) que em 1920, desenvolveu conjuntos com grau de pertinência. Esse conhecimento combinado aos conceitos da lógica clássica, desenvolvida por Aristóteles, serviram de base para que Lofti A. Zadeh, em meados da década de 60, chegasse a ser o primeiro autor de uma publicação sobre lógica *fuzzy*. Ao contrário da lógica booleana que admite apenas valores verdadeiro ou falso, a lógica difusa ou *fuzzy*, trata de valores que variam continuamente entre 0 e 1. Dessa forma um fato pode ser meio verdade 0,5, quase verdade 0,9 ou quase falso 0,1. O uso da lógica *fuzzy* em sistemas de raciocínio traz impacto não somente na máquina de inferência, mas também na representação do conhecimento. A lógica *fuzzy* permite expressar conhecimento em um formato de regra que é bastante parecido com linguagem natural. (SILVA, 2005).

2.6.1. Conjuntos nebulosos

Na teoria clássica, os conjuntos são denominados “crisp” e um dado elemento do universo em discurso pertence ou não pertence ao referido conjunto. Já na teoria dos conjuntos *fuzzy* existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto (ABAR,2004). Considerando-se os seguintes exemplos:

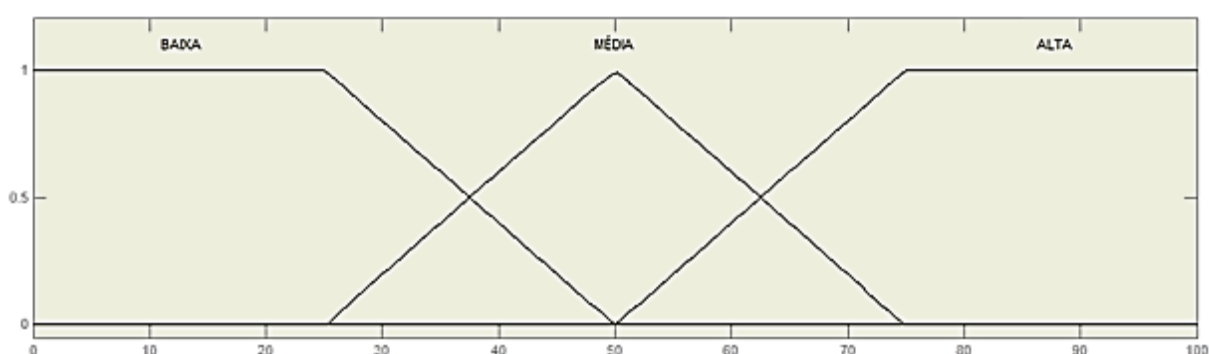
- Conjunto de pessoas magras;
- Conjunto de pessoas baixas.

Observa-se que não existem limites que definem quando uma pessoa pertence a qualquer um dos referidos conjuntos. Para os conjuntos nebulosos, definem-se critérios e graus de pertinências para tais situações.

2.6.2. Variáveis linguísticas

Define-se uma variável linguística como aquela cujo valor são nomes de conjuntos *fuzzy*. Sua principal função é fornecer uma maneira sistemática de aproximação de fenômenos complexos ou mal definidos. Segundo Sandri e Correa (1999), uma variável linguística pode ser definida por uma quádrupla $(X, \Omega, X(T), M)$, onde X é o nome da variável, Ω é o universo de discurso de X , $T(X)$ é um conjunto de nomes para valores de X e M é uma função que associa uma função de pertinência a cada elemento de $T(X)$. Como exemplo pode-se citar a classe social de uma pessoa que, conforme Figura 10, pode ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média e alta.

Figura 10. Função de pertinência para a variável classe social



Fonte: Elaboração própria

Os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construída a partir de termos próprios (baixo, médio, alto), de conectivos lógicos (negação não, conectivos e/ou), de modificadores (muito, pouco) e de delimitadores (como parênteses).

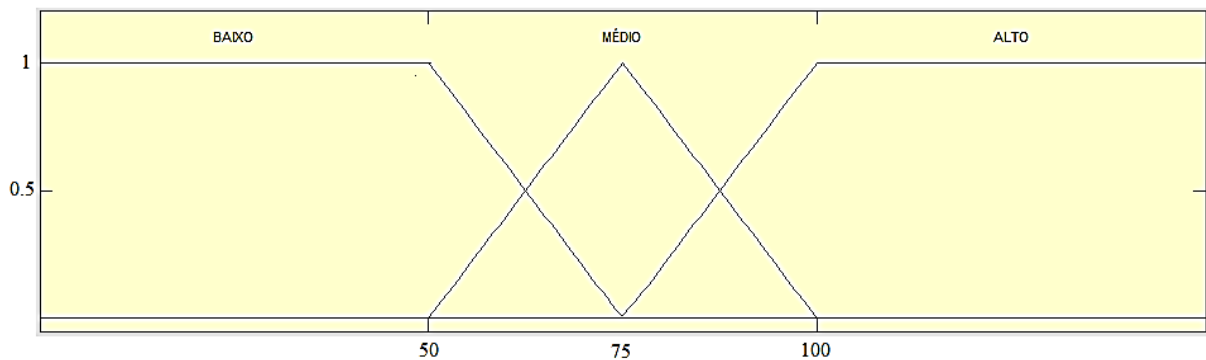
2.6.3. Funções de pertinência

Formalmente, um conjunto nebuloso A do universo de discurso Ω é definido por uma função de pertinência $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$. Essa função associa a cada elemento x de Ω o grau $\mu_A(x)$, com o qual x pertence A . A função de pertinência $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A :

- $\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;
- $\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas (GONÇALVES, 2007). Considerando-se a variável linguística massa corporal, constituída dos seguintes termos: $T(\text{peso}) = \{\text{baixo}, \text{médio}, \text{alto}\}$. A esses termos deve-se corresponder conjuntos *fuzzy* A , B e C , respectivamente, definidos por suas funções de pertinência. Uma escolha possível de funções de pertinência encontra-se ilustrada na Figura 11.

Figura 11. Função de pertinência para a variável massa corporal



Fonte: Elaboração própria

Pela definição acima, tem-se que pessoas de até 50 Kg apresentam grau de pertinência igual a 1 no conjunto A ; o grau de pertinência nesse conjunto decresce à medida que a massa corporal aumenta. Uma pessoa de 75 Kg é totalmente compatível com o conjunto B , enquanto que pessoas com massa corporal acima de 82 kg (aproximadamente), apresentam grau de pertinência diferente de zero em C . Pessoas acima de 100 Kg definitivamente estão com a massa corporal alta.

2.6.4. Base de regras

A base de regras é formada por estruturas do tipo

Se <premissa> **Então** <conclusão>

Considerando o seguinte exemplo:

Se Erro é Positivo Alto **e** Δ Erro é Negativo Baixo **Então** Posição e Positivo Baixo

Estas regras são processadas pelo mecanismo de inferência, o qual infere as ações de controle de acordo com o estado do sistema, aplicando o operador de implicação, conforme o procedimento de inferência. Em um dado controlador nebuloso, é importante que existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear totalmente as combinações dos termos das variáveis, ou seja, que a base seja completa, garantindo que exista sempre ao menos uma regra a ser disparada para qualquer entrada. As premissas são relacionadas pelos conectivos lógicos, dados pelo operador de conjunção (e) e o operador de disjunção (ou). Em geral as regras tem a forma de um sistema de múltiplas entradas e saídas (MIMO), mas que pode ser transformado em vários sistemas com múltiplas entradas e uma saída (MISO) (SANDRI, CORREA,1999).

2.7.TÉCNICAS DE RASTREAMENTO MPPT

Para que o módulo PV tenha o máximo aproveitamento da capacidade de energia elétrica que ele é capaz de produzir, ele deve operar no ponto de máxima potência. Como citado anteriormente, esse ponto varia ao longo do dia e depende das condições de irradiação solar e temperatura ambiente às quais o módulo é exposto. Dessa forma, para que o sistema tenha a melhor eficiência, ele deve operar o maior tempo possível no MPP. Para garantir essa situação, deve-se utilizar uma técnica de rastreio que procure esse ponto. As técnicas que se baseiam nesse princípio de funcionamento são denominadas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Existem várias técnicas MPPT, sendo as mais utilizadas a de tensão constante (CV- *Constant Voltage*), perturbação e observação (P&O- *Perturbation and Observation*) e condutância incremental (InCond – *Incremental Conductance*). Esses métodos variam em complexidade, velocidade de convergência, sensores requeridos, custo, faixa de eficiência,

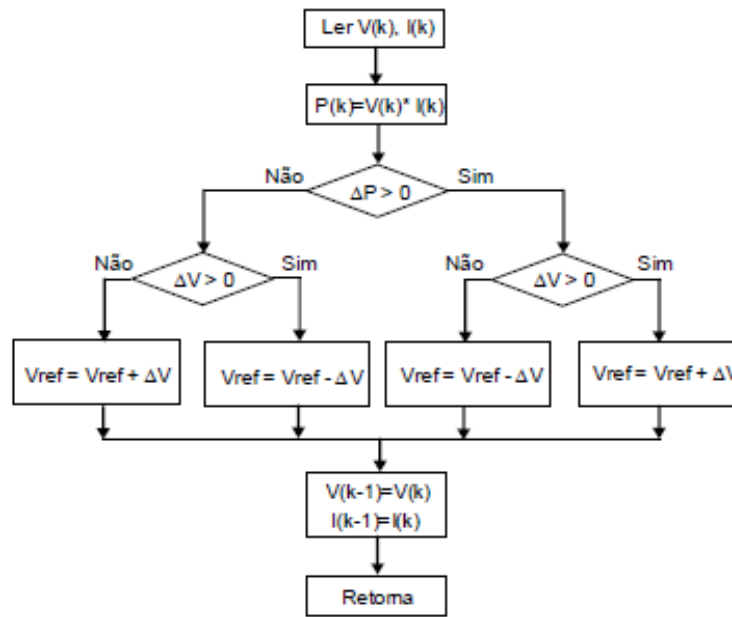
implementação em hardware, entre outros aspectos (ESRAM, CHAPMAN, 2007). Como neste trabalho foi adotado o método tradicional P&O, que será comparado ao método utilizando lógica *fuzzy*, será feita uma abordagem apenas sobre esse método.

2.7.1. Técnica Perturbação e Observação (P&O)

Esta técnica tem sido utilizada na maioria dos casos devido a sua fácil implementação, visto que possui uma estrutura simples de controle e necessita de poucos parâmetros (tensão e corrente do módulo fotovoltaico) para realizar o MPPT. O método P&O consiste em perturbar a tensão do painel fotovoltaico em uma dada direção e observar o comportamento de sua potência de saída. Se a potência aumentar, a perturbação continua na mesma direção, senão, o sistema é perturbado na direção contrária. O processo descrito é repetido periodicamente. Percebe-se que o MPP nunca será atingido, visto que a técnica estará sempre perturbando a tensão do painel fotovoltaico. Assim, em regime permanente, o sistema oscila em torno do MPP desperdiçando um pouco da energia disponível nos painéis. Essa oscilação pode ser minimizada reduzindo-se o tamanho da perturbação, todavia perturbações muito pequenas tornam a técnica lenta para rastrear o MPP.

A Figura 12 mostra o fluxograma do método P&O usado neste trabalho, cuja referência para a variável de controle é a tensão do painel fotovoltaico (V_k). O controle deverá minimizar a diferença das tensões. Para que isso ocorra, o algoritmo MPPT perturba periodicamente a variável de controle (V_k), adicionando ou subtraindo um determinado valor fixo (ΔV_k). Após esse procedimento, ele compara a potência do arranjo fotovoltaico (P_k) instantânea produzida por essa perturbação com a potência imediatamente antes a esta mesma perturbação (P_{k-1}). Baseado nesse procedimento, tem-se que o algoritmo funciona da seguinte maneira: primeiramente inicializa-se as variáveis V_k , ΔV_k e P_{k-1} . Em seguida, mede-se os valores de V_k e I_k , a fim de determinar o valor da potência (P_k) naquele instante. Nesse momento, deve-se observar o valor obtido para a potência. Assim, caso P_k seja maior que o valor de P_{k-1} , isso significa que a última perturbação (ΔV_k atual) conduziu ao aumento da potência, logo, a perturbação posterior é feita na mesma direção ($V_{katual} = V_k + \Delta V_k$), com ΔV_k positivo. Todavia, se P_k for menor que o valor de P_{k-1} , então o controle perturba o sistema na direção oposta, fazendo com que a saída seja dada por $V_{katual} = V_k - \Delta V_k$, com ΔV_k negativo. Assim, o valor da potência será dado por $P_{k-1} = P_k$, o que implica em dizer que o MPP será rastreado continuamente.

Figura 12. Fluxograma da Técnica Perturbação e Observação (P&O)

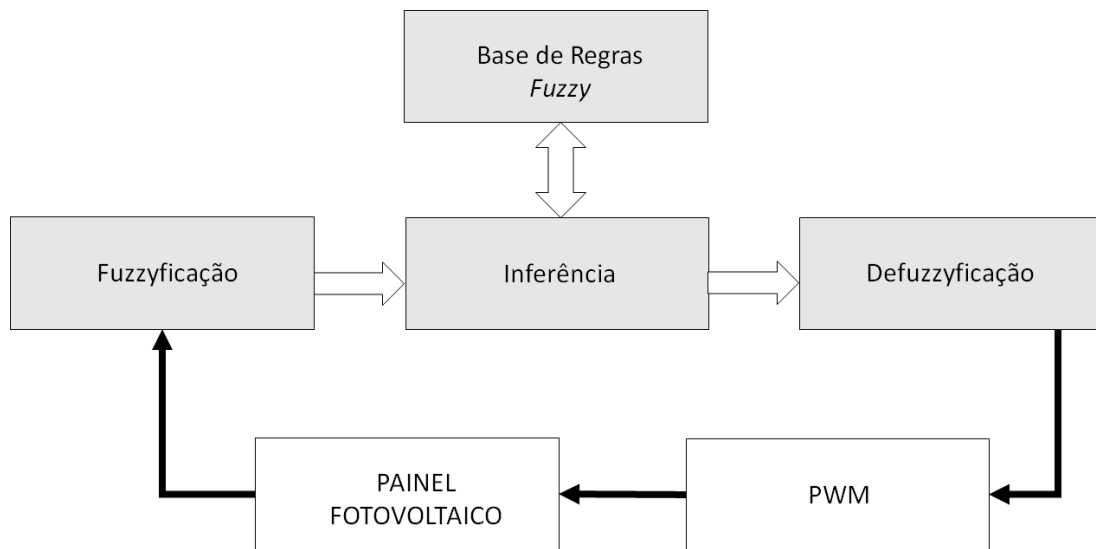


Fonte: Seguel, 2009

2.7.2. Técnica através da Lógica Fuzzy

Controladores implementados com lógica *fuzzy* possuem a vantagem de não necessitarem de um modelo matemático para o tratamento das não linearidades do sistema. O controle através da lógica *fuzzy* é feito por meio de três estágios: fuzzyficação, base de conhecimento e defuzzyficação. Como mostra a Figura 13, a tensão de saída do módulo fotovoltaico é realimentada para o bloco “Fuzzyficação” onde será convertida para a linguagem *fuzzy*. O bloco “Mecanismo de inferência” orientado pelo bloco “Base de regras”, pode então tomar decisões baseadas na lógica *fuzzy*, que serão devolvidas ao sistema pelo bloco “Defuzzyficação”. Esse último bloco é responsável pela conversão das informações da linguagem *fuzzy* para uma variável numérica. Esse processo fornece um sinal analógico que irá controlar o *duty cycle* do conversor PWM, variando então o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico (ESRAM, 2007).

Figura 13. Modelo do método através da Lógica *Fuzzy*



Fonte: Elaboração própria

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados a modelagem e implementação do sistema de geração de energia fotovoltaico, composto por um módulo fotovoltaico, um conversor do tipo abaixador de tensão e um banco de baterias.

Detalha-se todos os blocos utilizados para determinar as grandezas que caracterizam o módulo fotovoltaico. Em seguida, é feita a modelagem do conversor que faz a ligação entre o arranjo fotovoltaico e o banco de baterias e é responsável pelo controle do MPPT. E por último, faz-se a parametrização do banco de baterias.

3.1. MODELAGEM DO PAINEL FOTOVOLTAICO

No presente trabalho, foi utilizado o modelo matemático de um diodo, também conhecido como modelo real. Para isso, utilizou-se o software MATLAB/Simulink® onde foram realizadas todas as implementações e simulações necessárias para validação do modelo em estudo. Desprezou-se a resistência shunt, visto que ela possui um valor muito elevado, quando comparada ao valor da resistência em série. Considerou-se o valor da resistência série (R_s) como sendo $0,1 \Omega$, segundo Pandiarajan (2011).

O módulo utilizado para realizar as modelagens foi o KC85T do fabricante Kyocera, cuja as especificações foram apresentadas na Tabela 1. Ainda de acordo com Pandiarajan (2011), para realizar a modelagem de um módulo fotovoltaico são necessários blocos que abordem as seguintes variáveis: fotocorrente (I_{ph}), corrente de saturação reversa (I_{rs}), corrente de saturação (I_o) e corrente de saída do painel fotovoltaico (I_{pv}). Partindo dessa ideia, foram desenvolvidos sete blocos ao total para realizar a modelagem de um módulo fotovoltaico.

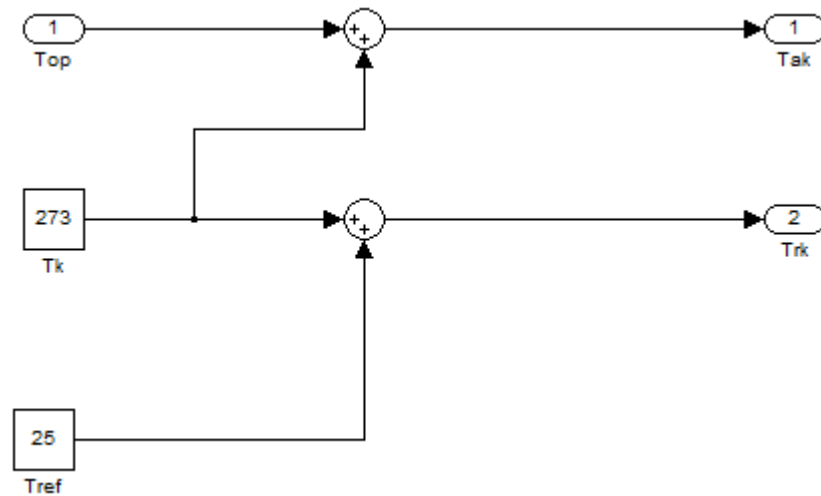
O primeiro bloco desenvolvido converte a temperatura de operação do módulo fotovoltaico de graus Celsius para Kelvin. Este bloco encontra-se ilustrado na Figura 14 e na Figura 15 é mostrado as ligações entre entrada e saída desse bloco, obtidas a partir das Equações 11 e 12.

Figura 14. Bloco referente à conversão da temperatura de operação da célula fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria

Figura 15. Subsistema referente ao bloco "Conversão da temperatura"



Fonte: Elaboração própria

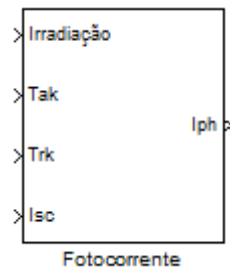
$$T_{rk} = 273 + 25 \quad (11)$$

$$T_{ak} = 273 + T_{op} \quad (12)$$

Os valores de T_{rk} e T_{ak} representam, respectivamente, a temperatura de referência adotada (298 K) e a temperatura de operação do módulo fotovoltaico em Kelvin. Já a variável T_{op} é a temperatura de operação do módulo em graus Celsius.

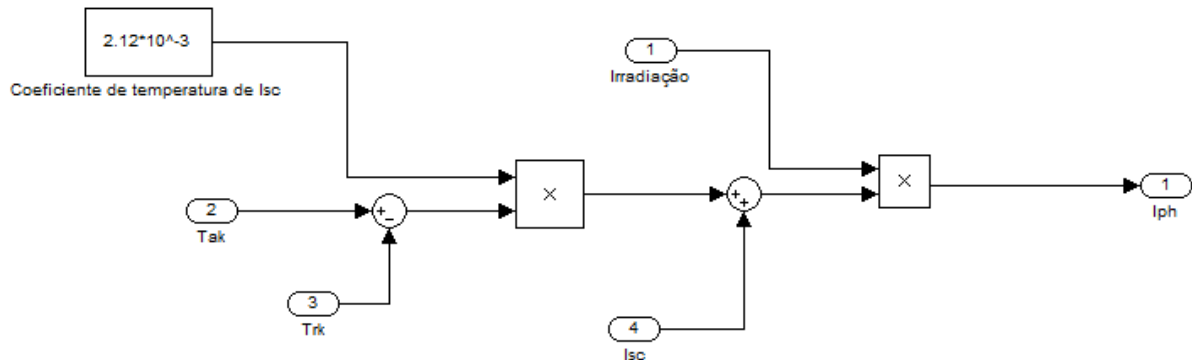
O segundo bloco refere-se à fotocorrente, que de acordo com a Equação 13 é função da temperatura de operação do módulo fotovoltaico (T_{ak}), da temperatura de referência (T_{rk}), da corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico (I_{sc}) e da irradiação. Na Figura 16 é ilustrado o bloco referente à Fotocorrente e na Figura 17, as ligações desenvolvidas nele.

Figura 16. Bloco referente à fotocorrente



Fonte: Elaboração própria

Figura 17. Subsistema referente ao bloco “Fotocorrente”



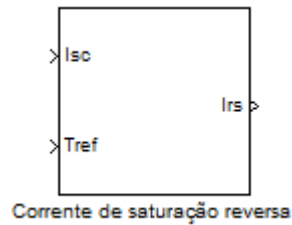
Fonte: Elaboração própria

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \times (T_{ak} - T_{rk})] \times G \quad (13)$$

A variável “Coeficiente de temperatura de I_{sc} ” (designada na Equação 13 por K_i) é uma constante que representa o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito e pode ser encontrada no *datasheet* do fabricante do módulo fotovoltaico. Para o módulo utilizado nesse trabalho, tem-se que esse valor é dado por $2,12 \times 10^{-3} A/^{\circ}C$ (conforme Tabela 1). A variável G representa a irradiação (KW/m^2) e a variável I_{sc} significa o valor da corrente de curto-circuito para o módulo utilizado nas condições de teste padrão (STC).

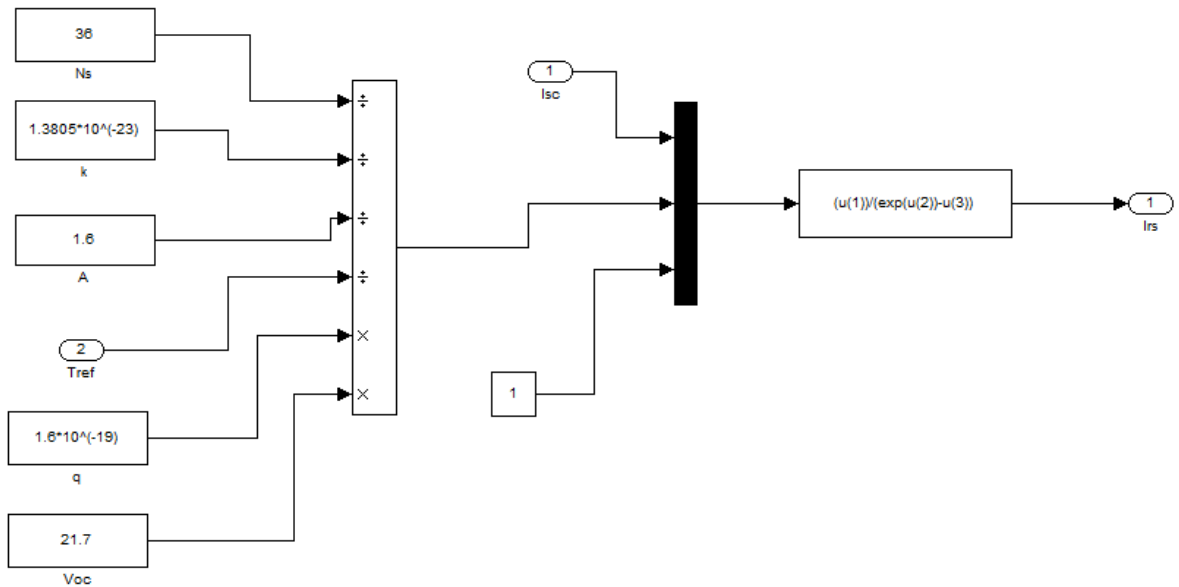
O terceiro bloco refere-se a corrente de saturação reversa que é obtida através da Equação 14. Como pode-se observar, ela depende das seguintes variáveis: corrente de curto-circuito (I_{sc}), da carga do elétron (q), da tensão de curto-circuito do módulo fotovoltaico (V_{oc}), do número de células em série (N_s), da constante de Boltzmann (k), do fator de idealidade (A) e da temperatura de operação (T_{ak}). A constante de idealização A é o fator que indica o quão perto as células se encontram uma da outra. Segundo (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) para o módulo em estudo (silício multicristalino de alta eficiência), esse fator é 1,3. Na Figura 18 é ilustrado esse bloco e na Figura 19 é mostrado o seu esquema de montagem.

Figura 18. Bloco referente à corrente de saturação reversa



Fonte: Elaboração própria

Figura 19. Subsistema referente ao bloco "Corrente de saturação reversa"

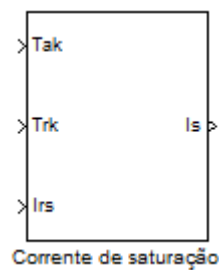


Fonte: Elaboração própria

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s A k T_{ak}}\right)} \quad (14)$$

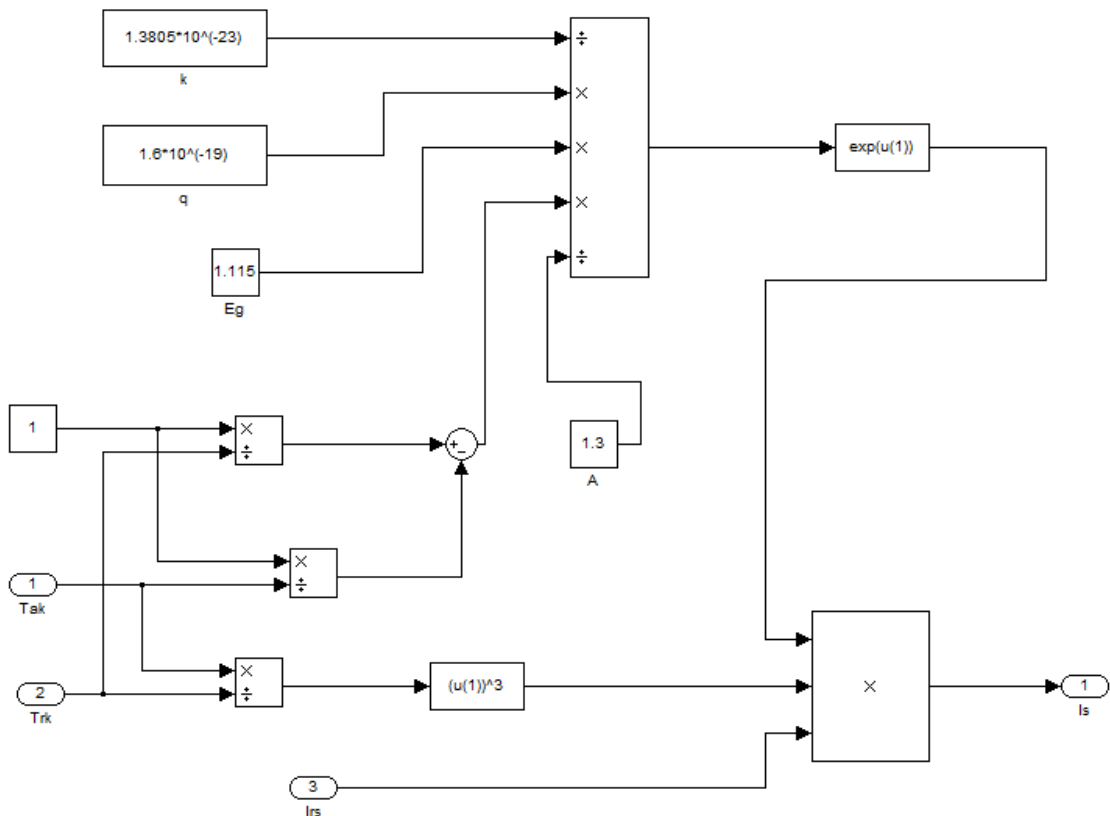
O quarto bloco representa a corrente de saturação que de acordo com a Equação 15 depende da corrente de saturação reversa (I_{rs}), da carga do elétron (q), da constante de Boltzmann (k), do gap de energia para o silício (E_g), do fator de idealidade (A), da temperatura de referência adotada (T_{rk}) e da temperatura de operação do módulo fotovoltaico (T_{ak}). De acordo com (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) o gap de energia para materiais semicondutores utilizados na fabricação de células solares é 1,115 eV. Na Figura 20 é ilustrado esse bloco e na Figura 21, o seu esquema de ligação.

Figura 20. Bloco referente à corrente de saturação



Fonte: Elaboração própria

Figura 21. Subsistema referente ao bloco " Corrente de saturação"

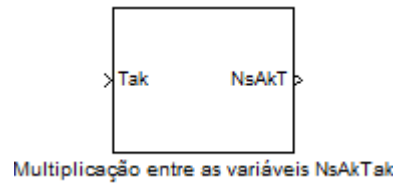


Fonte: Elaboração própria

$$I_0 = I_{rs} \times \left[\frac{T_{ak}}{T_{rk}} \right]^3 \times \exp \left[\frac{qE_g}{Ak} \left\{ \frac{1}{T_{rk}} - \frac{1}{T_{ak}} \right\} \right] \quad (15)$$

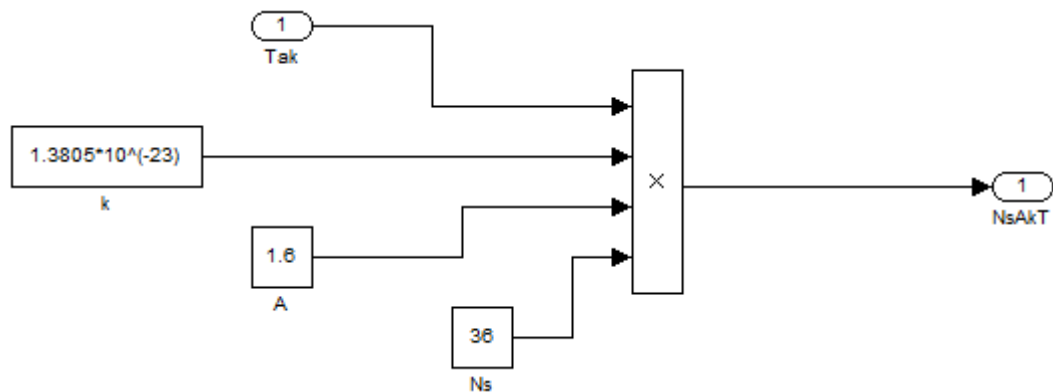
No quinto bloco é feita a multiplicação das seguintes variáveis: número de células em série (N_s), constante de Boltzmann (k), fator de idealidade (A) e temperatura de operação (T_{ak}). Na Figura 22 é ilustrado esse bloco e na Figura 23, as ligações desenvolvidas nele.

Figura 22. Bloco referente à multiplicação das variáveis N_s , k , A e T_{ak}



Fonte: Elaboração própria

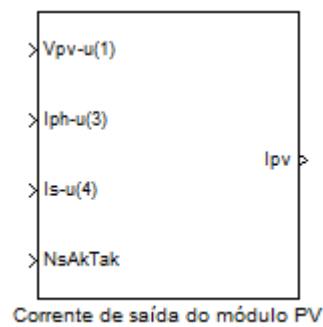
Figura 23. Subsistema referente ao bloco "Multiplicação entre as variáveis N_sAkTak "



Fonte: Elaboração própria

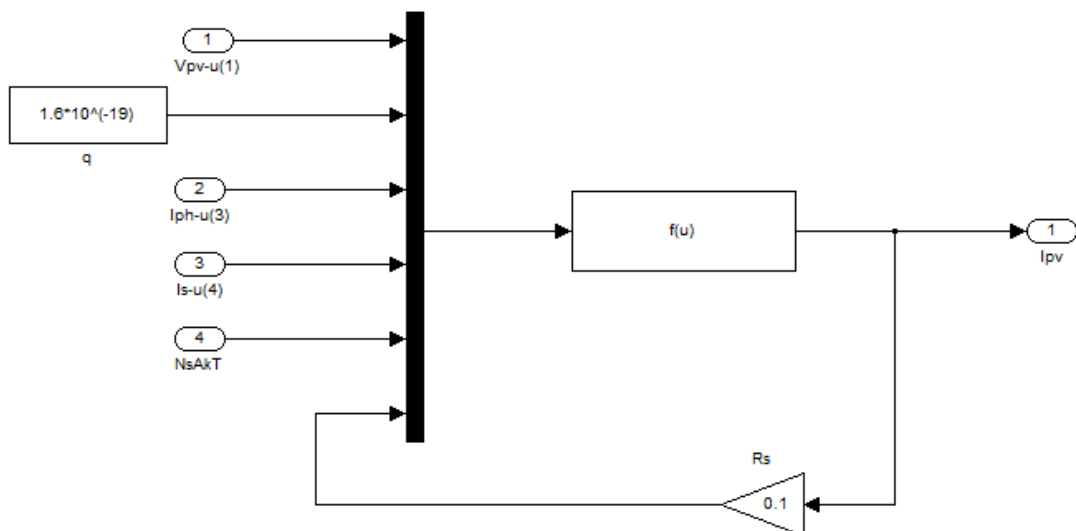
O sexto bloco representa a corrente de saída do módulo PV (I_{pv}), que é dada pela Equação 16. Ela é função das seguintes variáveis: número de células em série (N_s), número de células em paralelo (N_p), fotocorrente (I_{ph}), carga do elétron (q), resistência série (R_s), constante de Boltzmann (k), fator de idealidade (A), temperatura de operação (T_{ak}) e da tensão de saída do painel fotovoltaico (V_{pv}). A Figura 24 ilustra esse bloco e a Figura 25, suas respectivas ligações.

Figura 24. Bloco referente à corrente de saída do módulo fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria

Figura 25. Subsistema referente ao bloco "Corrente de saída do módulo PV"

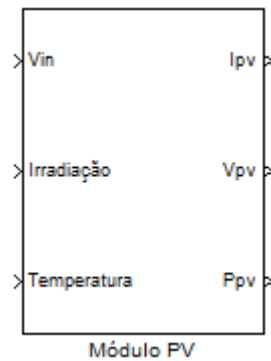


Fonte: Elaboração própria

$$I_{pv} = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_0 \times \left[\exp \left\{ \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{N_s k A T_{ak}} \right\} - 1 \right] \quad (16)$$

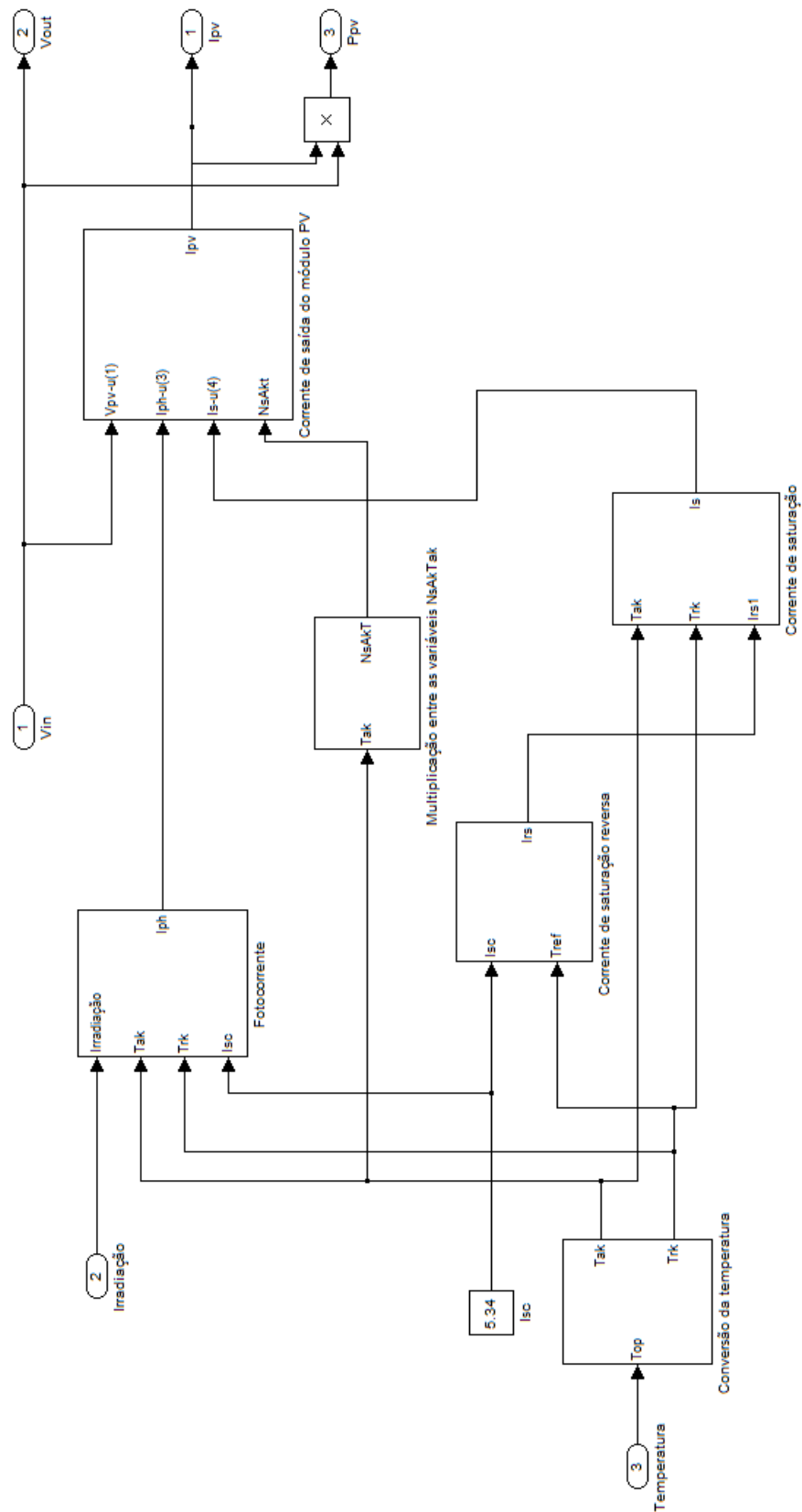
No sétimo bloco é feita a montagem final baseada nos blocos descritos anteriormente. Nele, as entradas são dadas pela tensão de entrada (V_{in}), irradiação e temperatura de operação do módulo PV e as saídas são tensão (V_{pv}), corrente (I_{pv}) e potência (P_{pv}) de saída do módulo PV. Na Figura 26 é ilustrado o respectivo bloco e na Figura 27, seu esquema de ligação.

Figura 26. Bloco referente ao módulo fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria

Figura 27. Subsistema referente ao bloco " Módulo PV"



Fonte: Elaboração própria

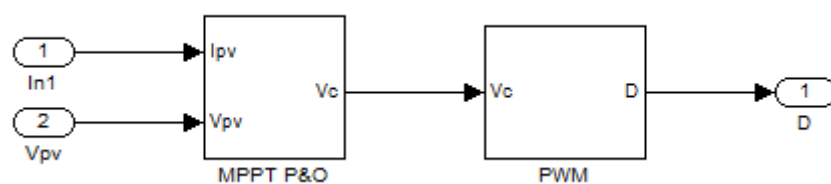
3.2. MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC

Para a modelagem e simulação do conversor *Buck* foram adotados os valores dos componentes segundo Seguel (2009). Nele foram obtidos os seguintes dimensionamentos: $C_o=560 \mu\text{F}$, $R_{se}=230 \text{ m}\Omega$, $L=558\mu\text{H}$, $R_L=41\text{m}\Omega$. O diodo Schottky deste conversor foi simulado como tendo uma queda de tensão de 0,8 V e resistência de condução de 15 m Ω . Para o capacitor de saída do painel foi adotado um valor de 4700 μF . A chave foi simulada como tendo uma resistência de condução *dreno-source* igual a 26,5 m Ω . Para o PWM foi definida uma frequência de chaveamento de 24 kHz e uma amplitude de rampa de 43,4 (tensão de circuito aberto do arranjo para a condições de padrão de teste STC).

3.3. MÉTODO MPPT PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O)

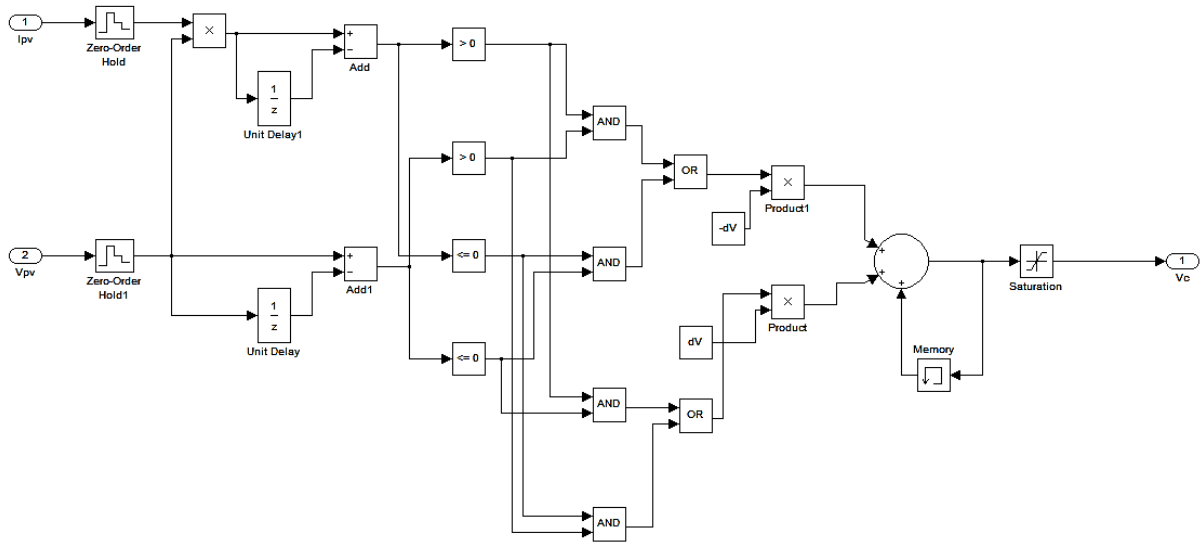
O diagrama de blocos do método P&O encontra-se ilustrado na Figura 28, onde I_{pv} e V_{pv} são as medidas de corrente e tensão do painel fotovoltaico, respectivamente. V_c é a tensão de referência fornecida pelo algoritmo para operação do arranjo em máxima potência e que constitui a entrada do bloco de modulação PWM que encontra-se conectado ao dispositivo comutador do conversor *Buck* que está conectado ao arranjo fotovoltaico. A Figura 29 ilustra as ligações referentes ao bloco MPPT P&O.

Figura 28. Diagrama de blocos referente ao Método P&O



Fonte: Elaboração própria

Figura 29. Subsistema referente ao bloco "MPPT P&O"



Fonte: Elaboração própria

3.4. MÉTODO MPPT ATRAVÉS DA LÓGICA FUZZY

O controle através da Lógica *Fuzzy* possui a vantagem de ser utilizado quando há mudança de condições de funcionamento da estrutura a ser controlada. O objetivo dessa técnica de controle é mover o ponto de operação elétrico do arranjo fotovoltaico o mais próximo possível do topo da curva característica. Matematicamente, é equivalente a encontrar o ponto onde a derivada dP/dV é igual a zero na curva característica do módulo fotovoltaico. A derivada é dada pela Equação 17.

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (17)$$

Ao erro $E(k)$ associa-se uma variação, dada pela Equação 18.

$$dE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (18)$$

A eficiência deste método depende do cálculo correto do erro, da sua derivada e da tradução do seu comportamento para a tabela da base de regras. A Figura 30 ilustra o funcionamento do modelo usando a curva característica V-P em três pontos de operação. Esses

pontos mostram, para cada situação de $E(k)$ e $dE(k)$, qual deveria ser a direção de rastreamento a ser seguida. Basicamente, se a última alteração do índice de modulação $D(k)$, provocar aumento na potência do painel, deve-se manter a direção de rastreamento no mesmo sentido, caso contrário, se a última alteração do $D(k)$ causar uma queda de potência do painel deve-se movê-lo na direção oposta. O aumento de V_{pv} é provocado por um aumento de $D(k)$ e a diminuição de V_{pv} , por uma diminuição de $D(k)$. Com base nisso, pode-se escrever que:

Ponto **A**: se $E(k) > 0$ e $dE(k) < 0$ [$E(k) < E(k-1)$], então $D(k) > 0$;

se $E(k) > 0$ e $dE(k) > 0$ [$E(k) > E(k-1)$], então $D(k) < 0$;

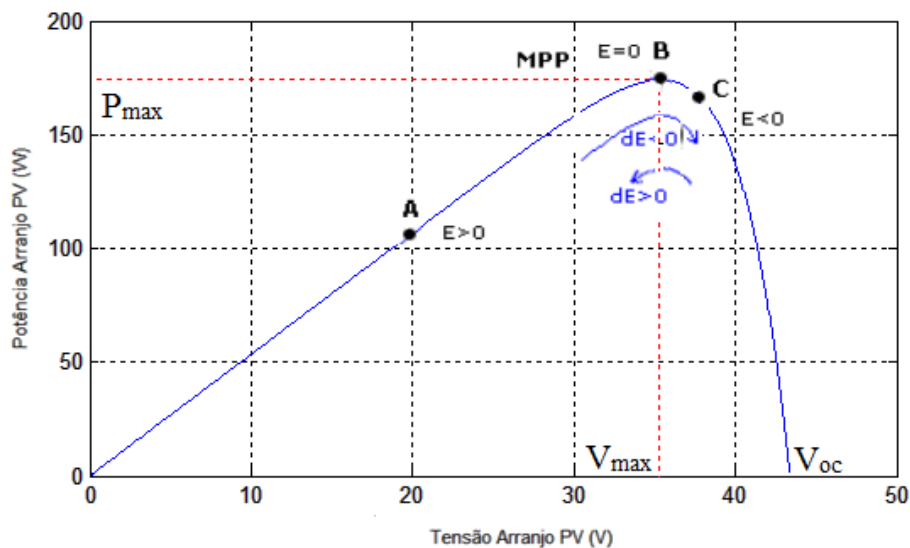
Ponto **B**: $E(k) = 0$;

Ponto **C**: se $E(k) < 0$ e $dE(k) < 0$ [$E(k) < E(k-1)$], então $D(k) < 0$;

se $E(k) < 0$ e $dE(k) > 0$ [$E(k) > E(k-1)$], então $D(k) > 0$.

O aumento de V_{pv} não irá, necessariamente, aumentar a potência. Pelo contrário, provocar essa condição irá ultrapassar o MPP e conduzir o arranjo PV para a tensão de circuito aberto V_{oc} .

Figura 30. Curva característica V-P do arranjo fotovoltaico



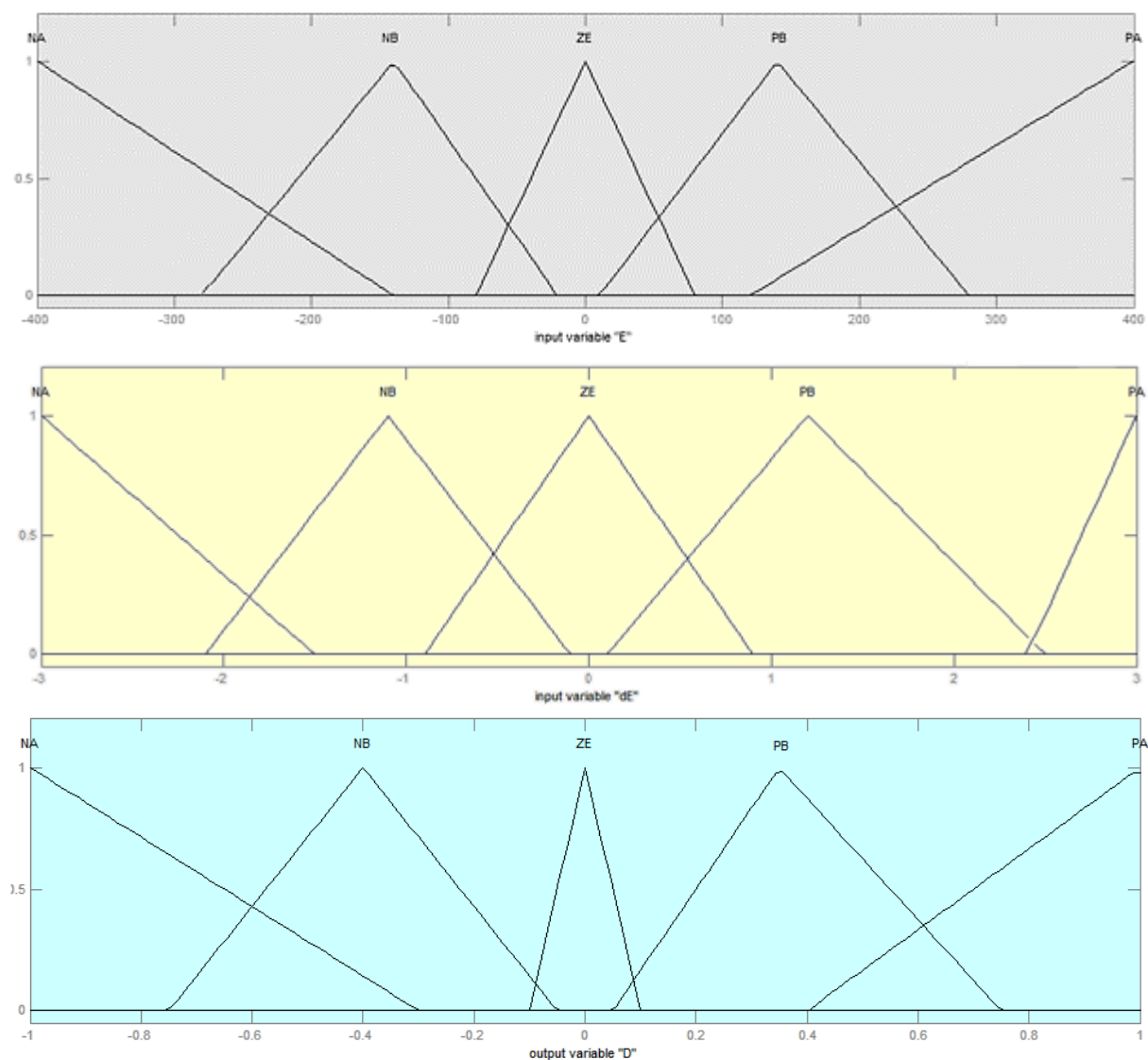
Fonte: Elaboração própria

O comportamento do sistema, descrito acima, pode ser traduzido para o controle *Fuzzy* usando a seguinte regra genérica:

Regra (i): **Se** $E(k)$ é Mx **e** $dE(k)$ é Ny **então** $D(k)$ é Zw

Em que Mx, Ny e Zw representam os conjuntos nebulosos incluindo: Positivo muito alto (PMA), positivo alto (PA), positivo baixo (PB), negativo baixo (NB), negativo alto (NA), negativo muito alto (NMA). A Figura 31 mostra as funções de pertinência das variáveis de entrada e saída desse controlador *Fuzzy*. Pode ser observado que o universo de discurso e a saída *Fuzzy* são normalizados. A normalização permite que em ambientes diferentes se possa aplicar o mesmo modelo de controle aqui apresentado sem necessidade de grandes ajustes a fim de adaptá-lo ao novo ambiente. A Figura 32 mostra as regras de controle que determinam o valor de $D(k)$ para qualquer par de entrada $E(k)$ e $dE(k)$.

Figura 31. Funções de pertinência do método *Fuzzy*



Fonte: Elaboração própria

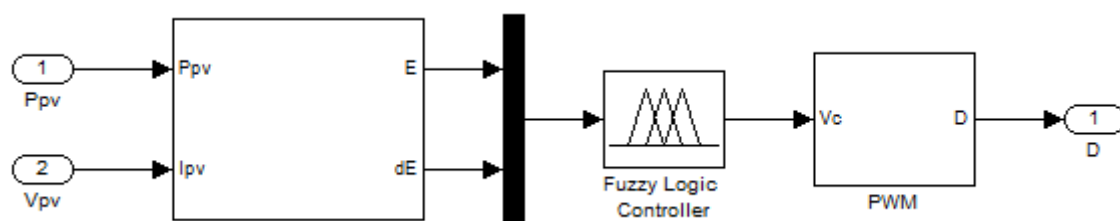
Figura 32. Tabela da base de regras para MPPT *Fuzzy*

E	dE				
	NA	NB	ZE	PB	PA
NA	NA	NA	NA	ZE	ZE
NB	NB	NB	NB	ZE	ZE
ZE	ZE	NB	ZE	PB	ZE
PB	ZE	ZE	PB	PB	PB
PA	ZE	ZE	PA	PA	PA

Fonte: Elaboração própria

A técnica de controle que utiliza a variável *duty cycle* (D) como saída do bloco de Lógica *Fuzzy* fornece a saída em valor do índice de modulação que controla a planta através de um modulador PWM, como mostra a Figura 33.

Figura 33. Esquema do bloco de controle Lógica *Fuzzy*



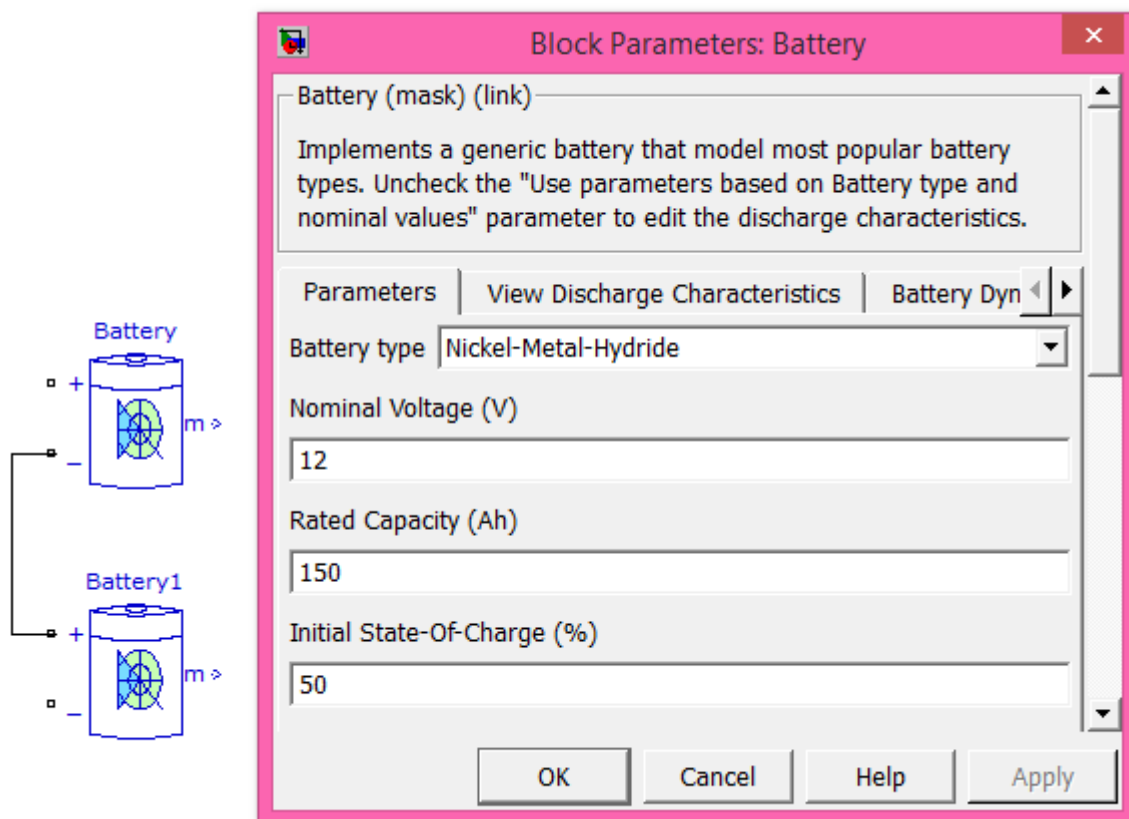
Fonte: Elaboração própria

A variação de *duty cycle* através da variação do índice de modulação traz o conceito de oscilação em torno do ponto máximo. Uma vez que o ponto de máxima potência for atingido, a potência pode diminuir por excesso de tensão que conduz a tensão de circuito aberto (Voc). Dessa forma, deve ser ajustado, incrementando ou decrementando um pequeno valor proporcional ao deslocamento da potência necessária para voltar ao MPP.

3.5. MODELAGEM DO BANCO DE BATERIAS

Para o banco de baterias foi utilizado um modelo genérico para baterias disponível no pacote *Power Systems* do *Simulink*. Os parâmetros adotados para cada bateria foram os seguintes: 12 V de tensão nominal, 150 Ah de capacidade e um estado de carga inicial (SOC) de 50% para cada bateria. Na Figura 34 encontra-se o banco de baterias implementado.

Figura 34. Banco de baterias implementado no *Simulink*

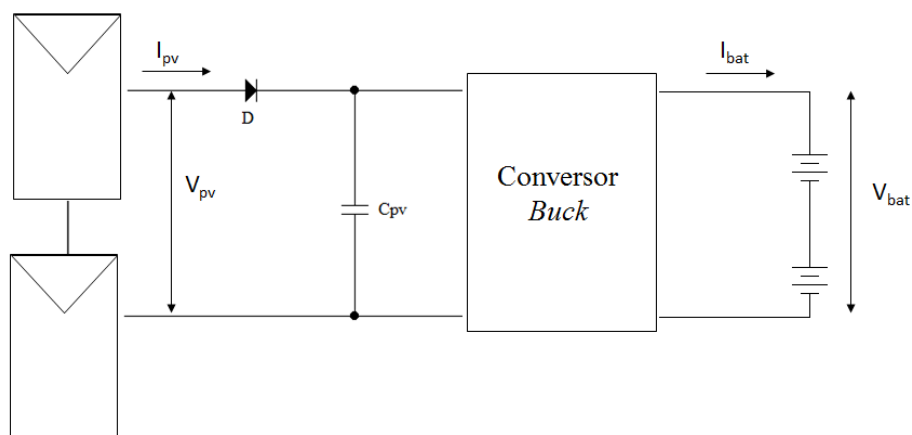


Fonte: Elaboração própria

4. RESULTADO DA SIMULAÇÃO

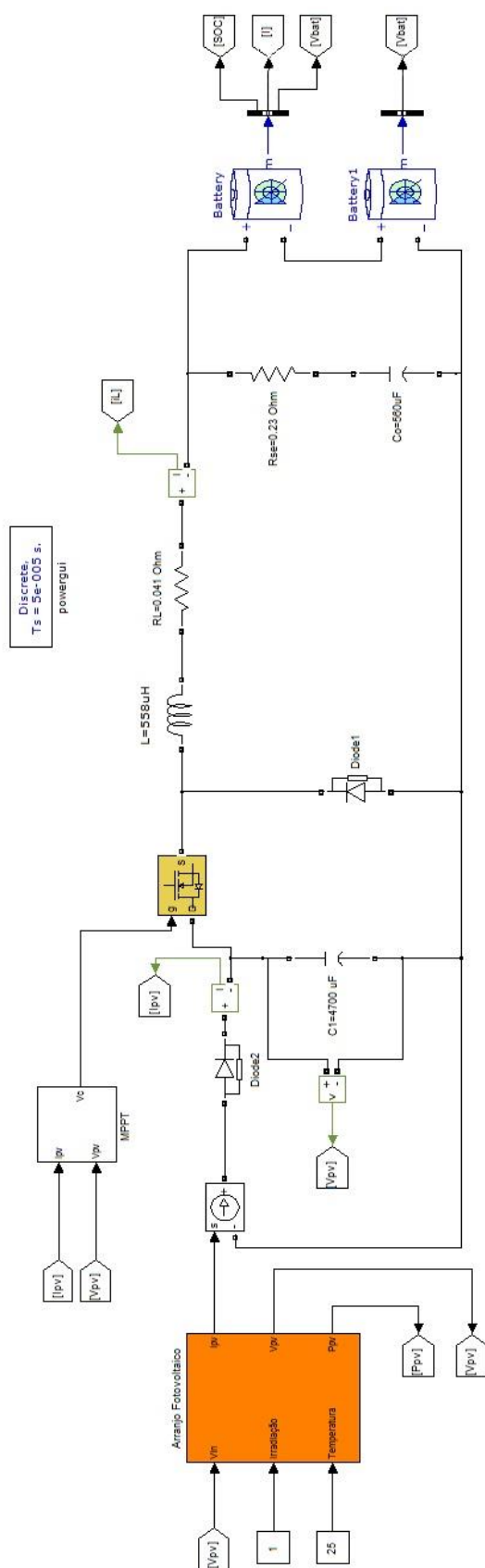
Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação de um sistema solar fotovoltaico para avaliação comparativa entre dois métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). O sistema é composto por um arranjo fotovoltaico formado por 2 módulos PV KC85T de 87 W em série conectados à entrada do conversor *buck*, através do qual será realizado o MPPT e, duas baterias, também conectadas em série à saída do conversor. O esquema dessa topologia encontra-se ilustrado na Figura 35 e na Figura 36 seu modelo implementado no *Simulink*.

Figura 35. Topologia do sistema fotovoltaico: painéis fotovoltaicos em série e baterias em série



Fonte: Elaboração própria

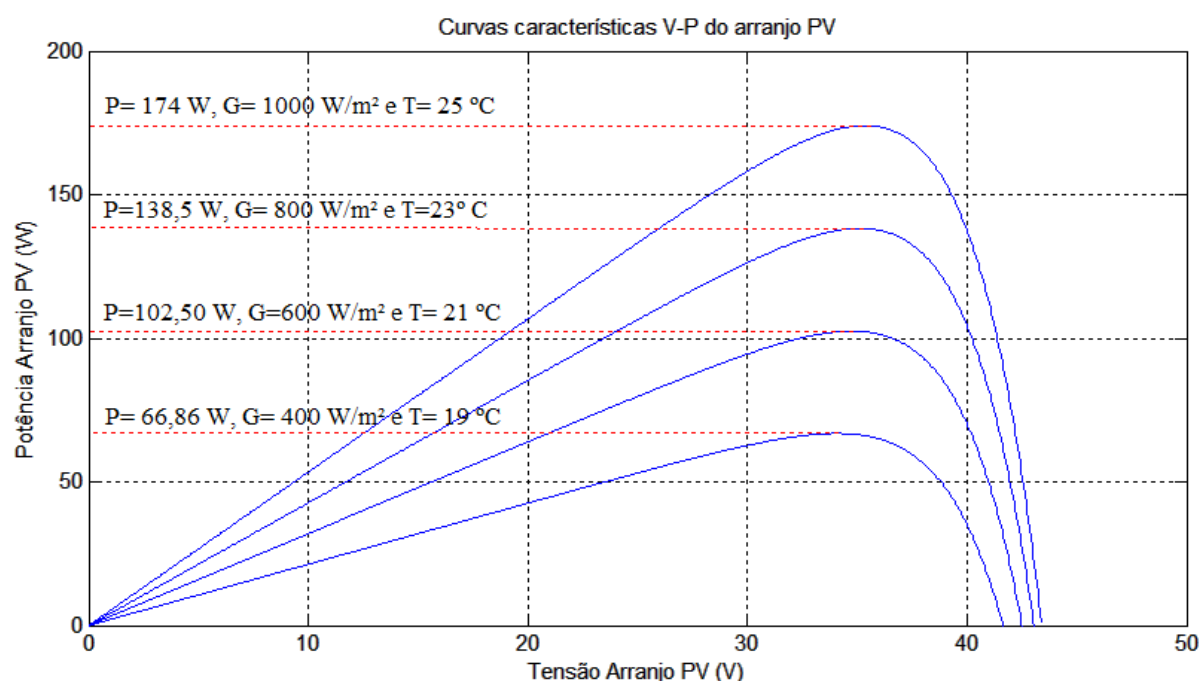
Figura 36. Modelo do sistema simulado



Fonte: Elaboração própria

A Figura 37 apresenta algumas curvas características V-P do arranjo fotovoltaico utilizado, em que é mostrado o valor para a sua operação em máxima potência, para diversas condições de irradiação solar e temperatura ambiente estimados pelo modelo PV para *Simulink*. O objetivo dessa simulação é verificar a velocidade de rastreamento, bem como a capacidade que cada método possui em rastrear e permanecer no ponto de máxima potência.

Figura 37. Curvas características V-P para o arranjo fotovoltaico para diferentes valores de irradiação e temperatura

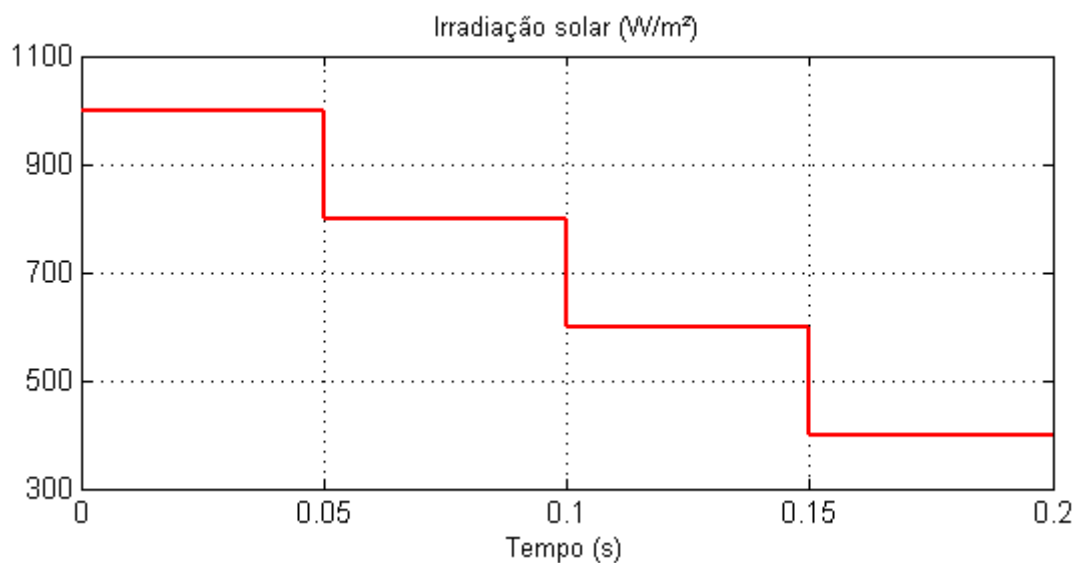


Fonte: Elaboração própria

4.1. MÉTODO MPPT PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O)

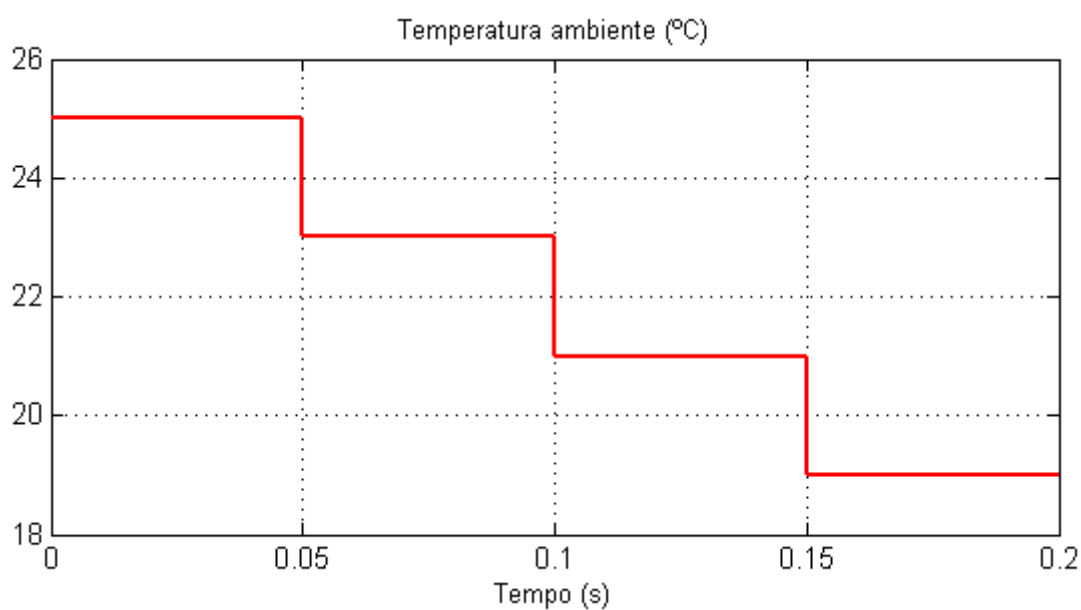
A Figura 38 ilustra a resposta do arranjo fotovoltaico em virtude da variação das variáveis irradiação solar e temperatura ambiente. Para obtê-la, foram utilizadas entradas do tipo degrau.

Figura 38. Simulação do MPPT através do método P&O (a) Irradiação solar, (b) Temperatura ambiente



(a)

Fonte: Elaboração própria



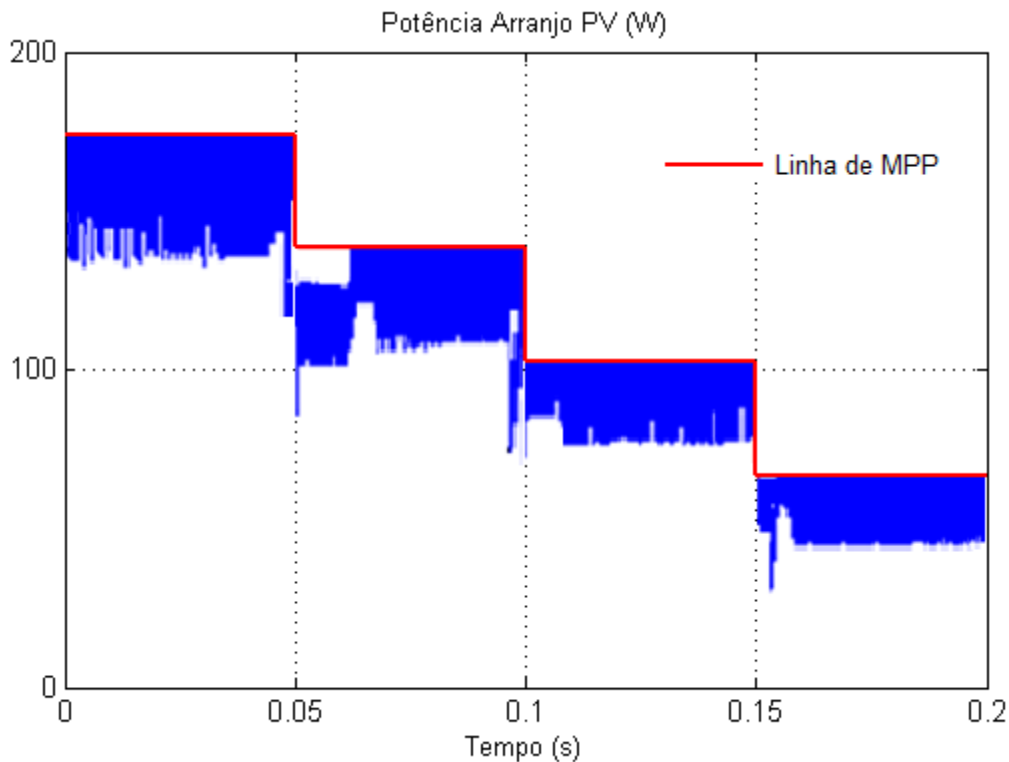
(b)

Fonte: Elaboração própria

Embora o método MPPT P&O possua a vantagem de não depender das características do módulo PV, ele apresenta a desvantagem de, em estado estacionário, oscilar em torno do ponto de máxima potência. Isso se deve ao fato do sistema está em constante perturbação, ocasionado, conseqüentemente, a perda de uma certa quantidade de energia disponível no arranjo fotovoltaico. Além disso, há os ruídos oriundos da frequência de chaveamento do

conversor utilizado. Em virtude dessas “perturbações” ao sistema, o resultado foi um sinal de máxima potência com alto nível de ruído. Essa oscilação pode ser observada na Figura 39 que ilustra a potência de saída do arranjo em função do tempo de simulação.

Figura 39. Potência do arranjo fotovoltaico através do método P&O



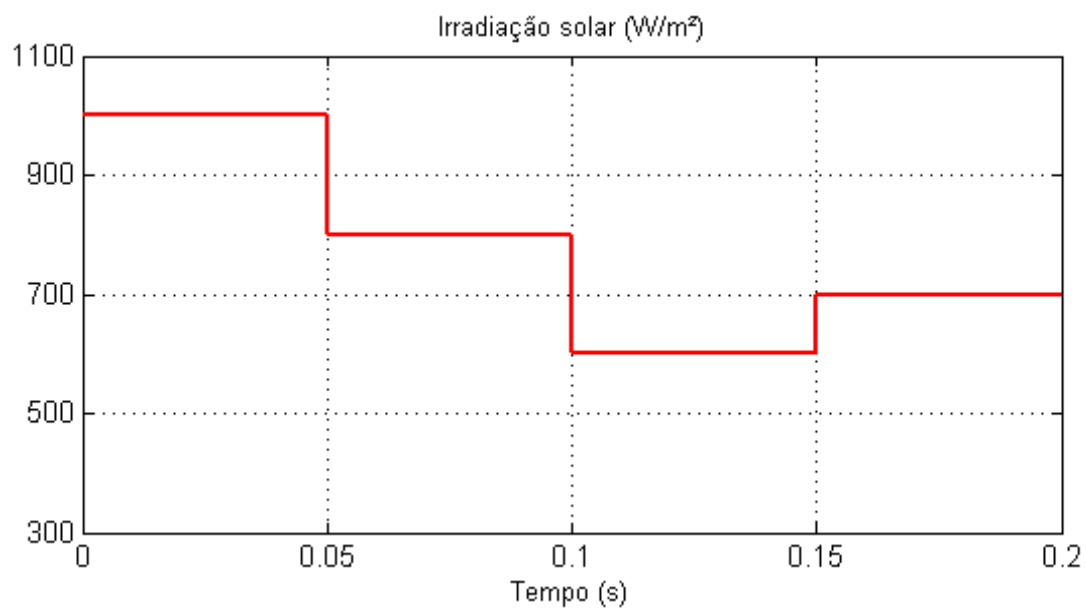
Fonte: Elaboração própria

Flutuações na potência em torno do ponto máximo sempre existirão em virtude do algoritmo do método P&O, que sempre produzirá perturbações a fim de avaliar o próximo ponto de operação. Baseado nessa característica do método, propõe-se uma outra técnica de controle do MPPT baseado na lógica *fuzzy*, com a finalidade de diminuir as flutuações e tempo de rastreamento do ponto de máxima potência. Com isso, será possível analisar e comparar qual o método mais eficiente.

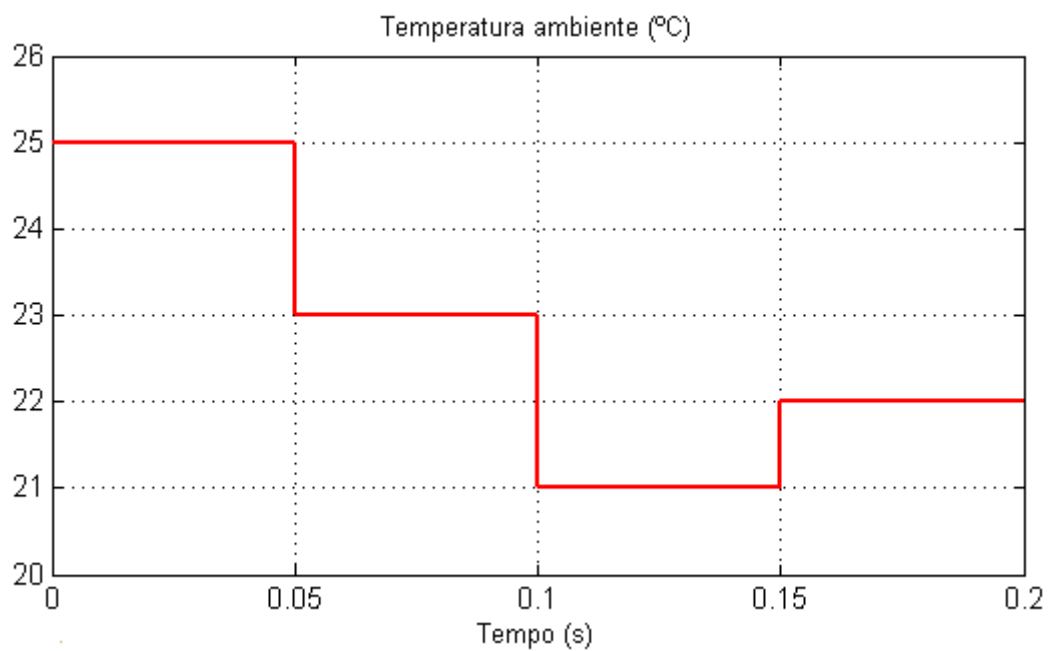
4.2. MÉTODO MPPT ATRAVÉS DA LÓGICA FUZZY

A Figura 40 ilustra a resposta do arranjo fotovoltaico em virtude da variação das variáveis irradiação solar e temperatura ambiente. Novamente, utilizou-se entradas do tipo degrau para observar o comportamento do arranjo.

Figura 40. Simulação do MPPT através da Lógica Fuzzy (a) Irradiação solar, (b) Temperatura ambiente

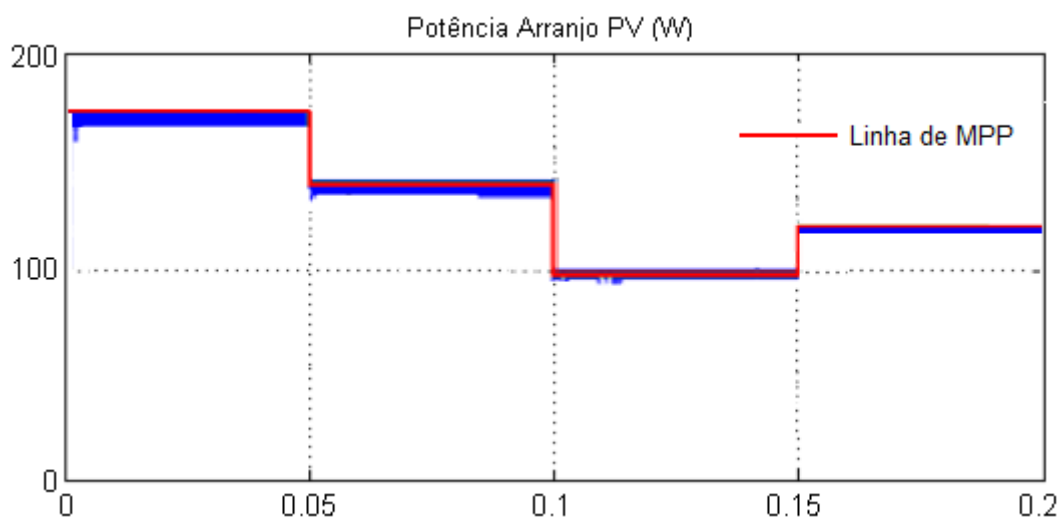


(a)
Fonte: Elaboração própria



(b)
Fonte: Elaboração própria

Figura 41. Potência do arranjo fotovoltaico através da Lógica Fuzzy



Fonte: Elaboração própria

Conforme mostra a Figura 41, o ponto de máxima potência controlado pelo *duty cycle* (D) tem um rastreamento feito de maneira rápida, em todas as condições de variação de irradiação e temperatura ambiente. Mesma assim, ainda apresenta a desvantagem de ser pouco flexível caso seja necessário alterar a estrutura a ser controlada. Isso se deve ao fato de que na modelagem do controlador, no bloco PWM, D possui um valor fixo, que varia entre 0 e 1. Não existem variações incrementais ou decrementais de D na direção do rastreamento. Com base nas medidas das variáveis de entrada (erro e variação do erro), o controlador fornece diretamente um novo valor de D que deverá conduzir o sistema para a operação em máxima potência a cada ciclo de controle. Muitas vezes este novo valor de D é uma aproximação que causa uma oscilação em torno do ponto máximo que dificilmente irá convergir com baixo ruído. Este tipo de controlador é baseado num arranjo fotovoltaico previamente montado a partir do qual se podem extrair as curvas características para projetar o controle.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada a modelagem de um sistema fotovoltaico, composto por painéis fotovoltaicos, um conversor abaixador de tensão e um banco de baterias, com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre dois métodos de controle MPPT aplicados ao conversor. O desempenho do conversor *buck* para rastreamento do ponto de máxima potência foi simulado através das técnicas de controle Perturbação e Observação (P&O) e por meio da Lógica *Fuzzy*.

Comparando-se os dois métodos, pode-se observar que os dois apresentaram resultados satisfatórios ao atingirem o ponto de máxima potência (MPP), porém com algumas características próprias a cada um deles. Identifica-se no método P&O a presença de elevados níveis de ruído, o que não foi confirmado pelo método *Fuzzy*. Além disso, o método através da Lógica *Fuzzy* apresenta outras vantagens, sendo a principal delas o fato de que não ser necessária a modelagem matemática do processo que se deseja controlar. A variável de controle, através da lógica *fuzzy*, adotada foi o *duty cycle* (D). Pelas respostas obtidas, pode-se observar que o mesmo demonstrou ser eficiente e adequado para rastrear o ponto de máxima potência. A partir disso, constata-se que esse método pode ser utilizado em qualquer tipo de configuração de arranjos fotovoltaicos e em outros modelos de módulos comerciais disponíveis, sem precisar de ajuste no modelo. Também, este tipo de controle apresenta a vantagem de não necessitar de um controlador PI, como em outros casos existentes. Dessa forma, eliminam-se possíveis erros no rastreamento causados por um ajuste ineficiente do controlador PI.

Com base na simulação desenvolvida no *Simulink*, em que obteve-se como resposta a potência de saída do arranjo fotovoltaico, pode-se verificar que o método MPPT *Fuzzy* apresentou o melhor desempenho no sistema. A análise apresentada mostrou que a operação em torno do MPPT com reduzido nível de ruído tende a reduzir o *ripple* nos terminais dos módulos PV, como também nos demais componentes (conversor *buck* e banco de baterias) que compõem o sistema fotovoltaico em estudo. A escolha da técnica de controle MPPT pode influenciar na especificação dos componentes do sistema. Assim, constatou-se que esse controlador além de melhorar a eficiência global do sistema, ainda minimiza as perdas de energia em consequência da mudança da irradiação solar.

5.1.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos com esse trabalho, pode-se sugerir alguns ajustes para trabalhos futuros, tais como:

- Realizar a análise do método MPPT P&O considerando a variável de controle como sendo a corrente de entrada no indutor (I_L), ao invés da corrente do painel (I_{pv});
- Realizar a análise do método MPPT através da Lógica *Fuzzy* considerando outros parâmetros de controle;
- Realizar o estudo comparativo, desta vez modificando a configuração dos painéis e do banco de baterias;
- Analisar a partir da sugestão acima, qual das configurações possui o controle com melhor eficiência;
- Modificar o tipo de conversor utilizado e observar a resposta do sistema.

REFERÊNCIAS

- ABAR, Celina. O Conceito Fuzzy. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2004. Disponível em: < <http://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm> >. Acesso em: 27 nov. 2014.
- ALTAS, I. H.; SHARAF, A. M.. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. IEEE, Canada, v. 3, n. 1, p.341-345, jul. 2007.
- ARMSTRONG, S.; HURLEY, W.G. Investigating the Effectiveness of Maximum Power Point Tracking for a Solar System. PESC '05. IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005, Recife, p. 204 – 209, 16-16 June 2005.
- ATTOU, A.; MASSOUM, A.; SAIDI, M.. Photovoltaic Power Control Using MPPT and Boost Converter. Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering, Algeria, v. 2, n. 1, p.23-27, set. 2014.
- CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel, 2014.
- DEMONTI, Rogers. Sistema de Co-Geração de Energia a partir de Painéis Fotovoltaicos. 1998. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- EPE. Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2014.
- ESRAM, Trishan; CHAPMAN, Patrick L.. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. IEEE, v. 22, n. 2, jun. 2007.
- FREIRE, Cristiano Augusto da Silva e CARVALHO, Paulo César Marques de. Comparação de dois modelos de células fotovoltaicas usando dados reais: modelo de dois diodos versus modelo de um diodo e quatro parâmetros. Encontro de Energia No Meio Rural, 3, 2000, Campinas.
- GONÇALVES, André Paim. Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.

KOTTAS, T.L.; BOUTALIS, Y.S.; KARLIS, A.D. New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive network. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 21, n. 5, p. 793 – 803, 3 Sept. 2006.

KRANZL, A.; KOPECEK, R.; PETER, K.; FATH, P. Bifacial Solar Cells On Multi-Crystalline Silicon With Boron Bsf And Open Rear Contact. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, HI, v. 1, p. 968-971, May 2006.

KYOCERA. KC85T HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE. 2014. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5177.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2014.

MARQUES, Fernando Nunes. Inversor flyback a quatro transistores controlado por um dispositivo FPGA para obter MPPT em sistemas fotovoltaicos. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

NEMA, Savita; NEMA, R. K.; AGNIHOTRI, Gayatri. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/ modules/ array and their experimental verification. International Journal Of Energy And Environment, India, v. 1, n. 3, p.487-500, mar. 2010.

P.SUDEEPIKA; KHAN, G.md. Gayaz. Analysis Of Mathematical Model Of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment. International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering. Tamilnadu, India, p. 7823-7829. mar. 2014.

PANDIARAJAN, N; MUTHU, Ranganath. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink. 1st International Conference on Electrical Energy Systems, India, 2011.

RASHID, Muhammad H. Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. São Paulo: Makron Books, 1999. 828 p.

RAZYKOV, T. M. Photovoltaic Solar Electricity: State of the Art and Future Prospects. ICEMS 2003 - Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003, v. 1, p. 297 - 301 vol.1, 9-11 Nov. 2003.

REBHI, Mhamed; BENATILLAH, Ali; SELLAM, Mabrouk. Comparative Study of MPPT Controllers for PV System Implemented in the South-west of Algeria. Energy Procedia, Algeria, v. 36, n. 1, p.142-153, jul. 2013.

REKIOUA, Djamila; MATAGNE, Ernest. Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulaton and Control. 1.ed. Londres: Springer, 2012. p. 53-87.

SANDRI, Sandra; CORREA, Cláudio. Lógica Nebulosa. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1999.

SEGUEL, Julio Igor López. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVA, Renato Afonso Cota. Inteligência artificial aplicada à ambientes de Engenharia de Software: Uma visão geral. Universidade Federal de Viçosa, 2005.

STEVENSON, Richard. First Solar: Quest for the \$1 Watt; Within five years, this company's thin-film solar cells could compete with coal. Revista Spectrum. Agosto de 2008.

TAKUN, Pongsakor; KAITWANIDVILAI, Somyot; JETTANASEN, Chaiyan. Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems. IMECS,Hong Kong, mar. 2011.

TAVARES, Carlos António Pereira. Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

VAZ, Alexandre Rodrigues. Filtro ativo de potência trifásico paralelo comandado para várias funções- Aspectos teóricos e práticos e reator eletrônico alto FP: contribuições a otimização da qualidade de energia. 2006. 226 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

ANEXO I- *DATA-SHEET* DO PAINEL SOLAR KC85T DO FABRICANTE KYOCERA

O módulo fotovoltaico KC85T é um painel solar multicristalino de alta eficiência (em torno de 16%) de 87W, fabricado pela Kyocera. Ele foi utilizado neste trabalho com o objetivo de simular o sistema de geração fotovoltaica e para o ajuste do modelo PV para MATLAB/*Simulink* de forma a representar módulos PV comerciais. Todos os dados construtivos, características elétricas, e as curvas características encontram-se no *data-sheet* deste anexo.

THE NEW VALUE FRONTIER



KC85T

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC MODULE



LISTED

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover

and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.



APPLICATIONS

- Microwave / Radio repeater stations
- Electrification of villages in remote areas
- Medical facilities in rural areas
- Power source for summer vacation homes
- Emergency communication systems
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Navigation lighthouses, and ocean buoys
- Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering
- Aviation obstruction lights
- Cathodic protection systems
- Desalination systems
- Recreational vehicles
- Railroad signals
- Sailboat charging systems
- etc.

QUALIFICATIONS

● **MODULE** : UL1703 certified
Hazardous Locations Class I, Div 2, Groups A, B, C and D

● **FACTORY** : ISO9001 and ISO 14001

QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal / Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

LIMITED WARRANTY

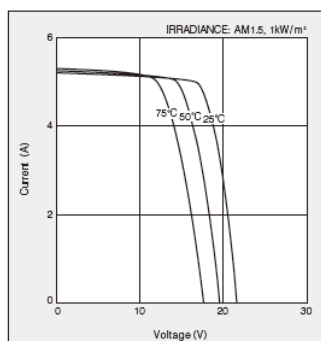
※ 1 year limited warranty on material and workmanship

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

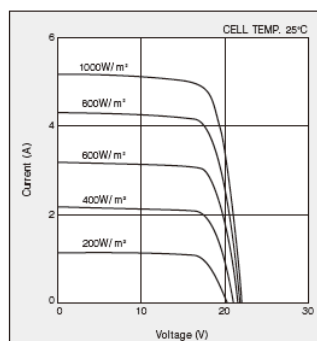
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic
Module KC85T at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic
Module KC85T at various irradiance levels

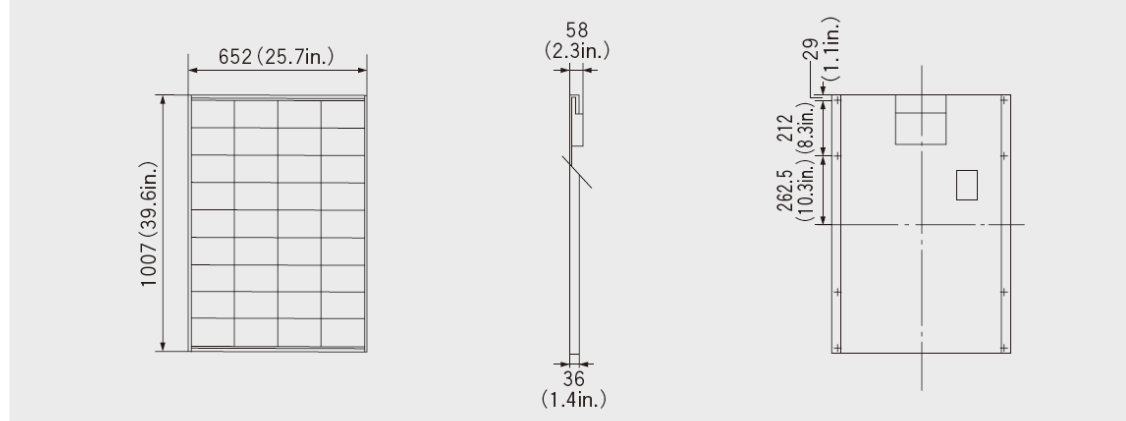


SPECIFICATIONS

KC85T

Physical Specifications

Unit : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (P _{max})	87W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	17.4V
Maximum Power Current (I _{mpp})	5.02A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	21.7V
Short Circuit Current (I _{sc})	5.34A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V _{oc}	−8.21×10 ^{−2} V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	2.12×10 ^{−3} A/°C
*STC : Irradiance 1000W/m ² , AM1.5 spectrum, module temperature 25°C	
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (P _{max})	62W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	15.3V
Maximum Power Current (I _{mpp})	4.06A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	19.7V
Short Circuit Current (I _{sc})	4.31A
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C	

Cells	
Number per Module	36
Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1007mm(39.6in.)×652mm(25.7in.)×58mm(2.3in.)
Weight	8.3kg(18.3lbs.)
Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	170.8mm(6.7in.)×191.8mm(7.5in.)×51.5mm(2.0in.)
IP Code	IP65
Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	6.1%
Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m ² to 200W/m ² (module temperature 25°C)	

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-8501, Japan
TEL:(81)75-604-3476 FAX:(81)75-604-3475
<http://www.kyocera.com>

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL:(1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431
<http://www.kyocerasolar.com>

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guignard 661, Loja A
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL:(55)21-2437-8525 FAX:(55)21-2437-2338
<http://www.kyocerasolar.com.br>

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL:(61)2-9870-3948 FAX:(61)2-9888-9588
<http://www.kyocerasolar.com.au/>

KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz Muller strasse 107, D-73730 Eeslingen, Germany
TEL:(49)711-93934-917 FAX:(49)711-93934-950
<http://www.kyocerasolar.de/>

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 168730
TEL:(65)6271-0500 FAX:(65)6271-0600

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL:(852)2-7237183 FAX:(852)2-7244501

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL:(886)2-2555-3609 FAX:(886)2-2559-4131

KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

19F, Tower C HeGiao Building 8A GuangHua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL:(86)10-6583-2270 FAX:(86)10-6583-2250

Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice

LIE/109H0703-SAGKM