



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

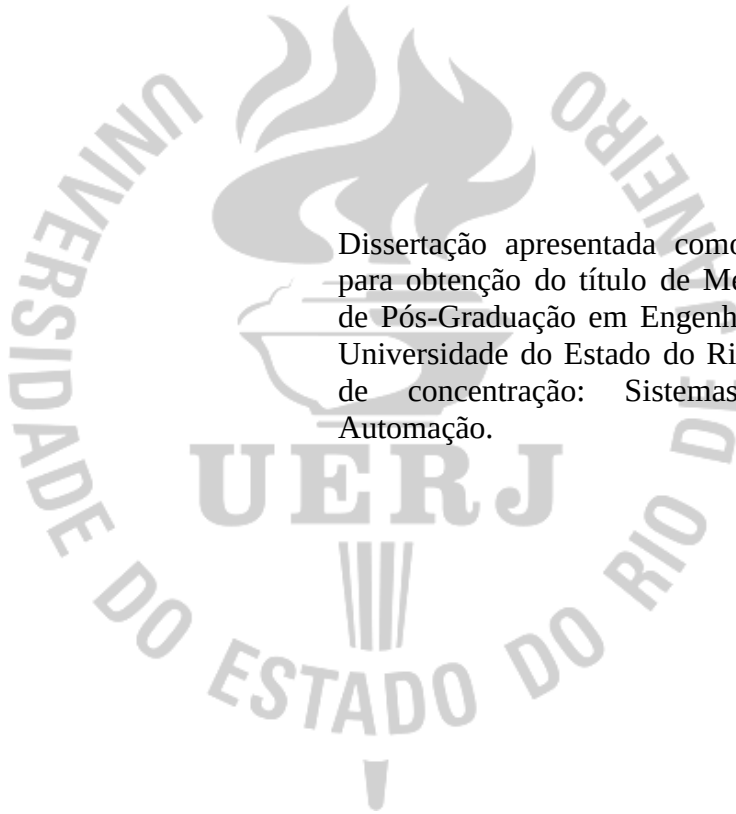
Carlos António Pereira Tavares

**Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar
Fotovoltaico**

Rio de Janeiro
2009

Carlos António Pereira Tavares

**Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar
Fotovoltaico**



Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre, ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área
de concentração: Sistemas Inteligentes e
Automação.

Orientadoras: Prof^a. Dr^a. Maria Dias Bellar

Prof^a. Dr^a. Karla Figueiredo

Rio de Janeiro
2009

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / CTCB

T231

Tavares, Carlos António Pereira.

Estudo comparativo de controladores Fuzzy aplicados a um sistema solar fotovoltaico / Viviane Japiassú Viana. – 2009.

129f.

Orientador: Maria Dias Bellar

Co-orientador: Karla Figueiredo

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Engenharia.

1. Controladores Elétricos. Lógica Fuzzy. I Bellar, Maria Dias. II. Figueiredo, Karla. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621.313.3

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Carlos António Pereira Tavares

**Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar
Fotovoltaico**

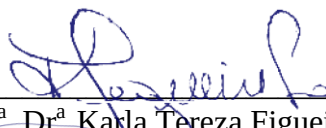
Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em 05 de Agosto de 2009.

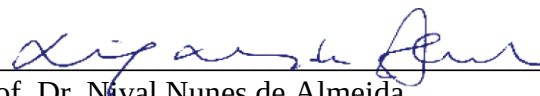
Banca Examinadora:



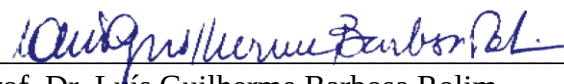
Prof.ª Dr.ª Maria Dias Bellar (Orientadora)
Faculdade de Engenharia, UERJ



Prof.ª Dr.ª Karla Tereza Figueiredo Leite (Orientadora)
Faculdade de Engenharia, PUC-RIO



Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida
Faculdade de Engenharia, UERJ



Prof. Dr. Luís Guilherme Barbosa Rolim
Escola Politécnica da UFRJ

Rio de Janeiro
2009

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha filha Lissa Gabriela, com todo o meu amor.

AGRADECIMENTOS

A dissertação que agora se apresenta resultou de um trajeto ao longo do qual fui recebendo apoio e estímulo de muitos. Neste sentido, os méritos que ela possa ter, devem-se também, aos contributos das pessoas que durante a sua elaboração, me proporcionaram testemunhos de vários gêneros. Por isso, a todos, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

À Deus, por estar sempre presente na minha vida, iluminando meu caminho e me dando forças para seguir sempre em frente.

Gostaria de destacar o papel desempenhado, neste trajeto, pela minha orientadora Maria Dias Bellar, por ter aberto a porta que me encaminharia para o tema tratado nesta dissertação sob sua orientação. Devo agradecer pelos ensinamentos, pelo apoio, paciência, interesse e amizade, pelo alento e força que conseguiu me transmitir.

À minha orientadora Karla Figueiredo, sinônimo de competência e estímulo, pela orientação segura e o incentivo demonstrado durante a elaboração deste trabalho. Agradeço também pelas críticas e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

Ao Programada de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro pela oportunidade de desenvolver este trabalho; aos seus coordenadores e ao corpo docente, em especial ao prof. José Paulo Cunha. Obrigado pelos saberes que me foram transmitidos, mas, sobretudo pelos conselhos e dicas que ajudaram a tornar esta dissertação uma realidade.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa concedida durante dois anos do curso.

Aos colegas do Mestrado pela excelente relação pessoal que criamos e que espero que não se perca.

À Nadine, minha namorada e companheira, pelos sacrifícios que esta dissertação a obrigaram. E à Lissa, pelas ausências do pai que sei que sentiu.

Aos meus pais, pela educação, base para minha vida e apoio nos meus estudos. Aos outros familiares que incentivaram e apoiaram esta etapa acadêmica da minha vida.

Finalmente, aos meus amigos que, contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas. A todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para esta dissertação tornar-se realidade gostaria de expressar minha profunda gratidão.

É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer.
Aristóteles

Fidjus, nhôs studa pamodi skóla ê ka pa mi, ê pa nhôs!
Tutucha, meu pai

RESUMO

TAVARES, Carlos António Pereira. *Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico*. 2009. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

Neste trabalho apresenta-se o modelo de um controlador baseado em Lógica Fuzzy para um sistema de energia baseado em fonte renovável solar fotovoltaica (*photovoltaic* - PV) *multi-string* em operação isolada, para o aproveitamento da máxima potência desta fonte. O sistema é composto por painéis solares, conversor CC-CC tipo elevador de tensão (*boost*), armazenamento por banco de baterias, inversor trifásico e carga trifásica variável. O sistema fotovoltaico foi modelado no MATLAB/Simulink de forma a representar a curva característica V-I do módulo PV, e que é baseado nos dados disponíveis em *data-sheets* de painéis fotovoltaicos comerciais. Outros estudos de natureza elétrica tais como o cálculo dos valores eficazes das correntes no conversor CC-CC, para avaliação das perdas, indispensáveis para o dimensionamento de componentes eletrônicos, foram realizados. O método tradicional *Perturb and Observe* de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – *MPPT*) de painéis foi testado e comparado com métodos que usam a Lógica Fuzzy. Devido ao seu desempenho, foi adotado o método Fuzzy que realiza o MPPT por inferência do ciclo de trabalho de um modulador por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - *PWM*) através da variação da potência pela variação da corrente do painel solar. O modelo Fuzzy adotado neste trabalho foi testado com sucesso. Os resultados mostraram que ele pode ser robusto e atende à aplicação proposta. Segundo alguns testes realizados, este controlador pode realizar o MPPT de um sistema PV na configuração *multi-string* onde alguns arranjos fotovoltaicos são usados. Inclusive, este controle pode ser facilmente adaptado para realizar o MPPT de outras fontes de energia baseados no mesmo princípio de controle, como é o caso do aerogerador.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico; Lógica Fuzzy, *Perturb and Observe*, rastreamento do ponto de máxima potência, MPPT.

ABSTRACT

This work presents the model of a Fuzzy Logic controller for a renewable energy system based on multi-string solar photovoltaic (PV) in stand-alone operation, to extract the maximum energy of this power source. The system consists of PV modules, DC-DC converter (Boost), a battery set, three-phase inverter and three-phase variable load. The photovoltaic system was modeled in MATLAB / Simulink in order to represent the V-I characteristic of the PV module, and which is based on the data provided by the manufacturer *data-sheet*. Other studies, such as the calculation of the RMS currents of the DC-DC converter components for evaluation of the losses, which are essential for the system design were accomplished. The conventional Perturb and Observe method for the Maximum Power Point Tracking (MPPT) of PV modules was tested and compared with methods that use Fuzzy Logic control. Due to its performance, it was adopted the Fuzzy method that performs the MPPT by inference of duty cycle of a Pulse Width Modulation (PWM) through the variation of PV power divided by the variation of the PV current. The Fuzzy model considered in this work was successfully tested. The results showed that it can be robust and suitable to the proposed application. According to some accomplished tests, the controller can perform the MPPT of a multi-string configuration of the solar PV system, in which several PV arrays are used. Moreover, it can also be easily adapted to perform the MPPT of other energy power sources based on the same control principle, as it is in the case of aerogenerators.

Keywords: Photovoltaic system, Fuzzy Logic, Perturb and Observe, maximum power point tracking, MPPT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.	30
Figura 2: Célula solar com multi-junção.	34
Figura 3 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica: (a) Modelo ideal, (b) Modelo de um diodo, (c) Modelo de dois diodos.	36
Figura 4 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica (modelo real).	37
Figura 5: Módulos ou painéis fotovoltaicos.	40
Figura 6: Diodo de <i>bypass</i> : (a) por célula; (b) por conjunto de células.	40
Figura 7: Diodo de bloqueio.	41
Figura 8: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.	41
Figura 9: Modelo <i>Simulink</i> de um arranjo fotovoltaicos ($V_{pv} = V_{arranjo}$; $I_{pv} = I_{arranjo}$).	43
Figura 10: Curva característica simulada para o painel BP Solar SX3200	44
Figura 11: Efeito do (a) incremento de R_s e (b) decremento de R_{sh}	46
Figura 12: Influência da irradiação e da temperatura ambiente nas curvas características do módulo BPX3200.	47
Figura 13: Configuração centralizada de sistema PV.	49
Figura 14: Configuração String, com conversor orientado ao módulo.	51
Figura 15: Conceito de equipe.	52
Figura 16: Configuração <i>multi-string</i>	53
Figura 17: Conceito <i>multi-string</i> como associação de sistemas centralizado e <i>string</i>	54
Figura 18: Configuração PV de módulo integrado.	55
Figura 19: Sistema solar isolado <i>multi-string</i>	56
Figura 20: Conversor <i>Boost</i>	58
Figura 21: Ganho estático do conversor <i>Boost</i>	58
Figura 22: Principais formas de onda do conversor <i>Boost</i>	59
Figura 23: <i>Ripple</i> : (a) de Tensão; (b) de Corrente.	60
Figura 24: Exemplo de um PWM. (a) Circuito PWM; (b) Pulso PWM.	60
Figura 25: Circuito equivalente do modelo da bateria.	62

Figura 26: Curva característica de descarga do banco de baterias: (a) Corrente nominal de uma bateria; (b) Correntes de carga e descarga de uma bateria; (c) Corrente nominal do banco de baterias.	63
Figura 27: Sistema fotovoltaico isolado.	64
Figura 28: Curvas características V-I do arranjo PV.....	65
Figura 29: Variação de: (a) G_a - Irradiação solar e (b) T_a - Temperatura ambiente.	66
Figura 30: Exemplo do sistema PV em operação sem MPPT.....	66
Figura 31: Diagrama de blocos do método $P\&O$ por I_{pv}	67
Figura 32 - Fluxograma do algoritmo $P\&O$ com saída $I_{ref} = I_{pvref}$	68
Figura 33: Simulação do método MPPT por $P\&O$ com saída I_{pv} . (a) G_a - Irradiação solar; (b) T_a - Temperatura ambiente e (c) P_{pv} – Potência do arranjo fotovoltaico.....	69
Figura 34: Diagrama de blocos do método $P\&O$ por I_L	70
Figura 35: Simulação do método MPPT por $P\&O$ através de I_L . (a) G_a - Irradiação solar; (b) T_a - Temperatura ambiente; (c) P_{pv} - Potência do arranjo PV; (d) P_{batt} - Potência do banco de baterias; (e) P_{loadT} - Potência da carga; (f) SOC - Estado de carga da do banco de baterias. ...	71
Figura 36: Influência do valor incremental da perturbação. (a) Valor de perturbação grande; (b) Valor de perturbação pequeno; (c) Potência do painel solar (FEMIA <i>et al.</i> , 2005)	73
Figura 37: Diagrama de blocos do controlador Fuzzy	75
Figura 38: Diagrama de blocos de controle Fuzzy por Inferência de I_{pv}	76
Figura 39: Funções de pertinência para o estimador MPPT Fuzzy por inferência de corrente do painel fotovoltaico.	77
Figura 40: Simulação do MPPT pelo método Fuzzy de inferência de corrente I_{pv} . (a) G_a - Irradiação solar; (b) T_a - Temperatura ambiente; (c) P_{pv} - Potência do arranjo PV; (d) P_{loadT} - Potência total da carga; (e) P_{batt} - Potência do banco de baterias; (f) SOC - Estado de carga da do banco de baterias.	80
Figura 41: Curva característica P-I de um módulo PV.....	83
Figura 42: Funções de pertinência do método Fuzzy por dP/dI com saída dD	84
Figura 43: Diagrama de blocos do controlador Fuzzy através de dD	85
Figura 44: Diagrama de blocos do controlador Fuzzy através de $D(k)$	86
Figura 45: Acumulador.....	86
Figura 46: Variação do índice de modulação $D(k)$ e do erro $E(k)$, em relação à variação da Irradiação, G_a , e da Temperatura, T_a	87
Figura 47: MPPT através do método Fuzzy por dP_{pv}/dI_{pv} . (a) G_a - Irradiação solar, T_a - Temperatura ambiente; (b) P_{pv} - Potência do arranjo PV com saída Fuzzy dD ; (c) P_{pv} -	

Potência do arranjo com saída Fuzzy D ; (d) P_{loadT} - Potência total da carga; (e) P_{batt} - Potência do banco de baterias; (f) SOC - Estado de carga da do banco de baterias.....	88
Figura 48: Potência do arranjo PV pelo método MPPT Fuzzy por dP_{pv}/dV_{pv} e saída $dD(k)$...	91
Figura 49: Correntes RMS no conversor <i>Boost</i> . (a) $I_{L\ rms}$ - corrente rms no indutor; (b) I_{mosfet_rms} - corrente rms na chave; (c) $I_{d2\ rms}$ - corrente rms no diodo do conversor <i>Boost</i>	93
Figura 50: Sistema fotovoltaico isolado baseado no conversor <i>multi-string</i>	95
Figura 51: Resultados de simulação para o sistema <i>multi-string</i> isolado. G_a - Irradiação solar; T_a - Temperatura ambiente; P_{pv} - Potência dos arranjos PV; $I_{abc\ f-nna\ carga}$ - Corrente fase-neutro na carga; $V_{abc\ na\ carga}$ - Tensão entre as fases da carga.	96
Figura 52 - Circuito equivalente da célula solar para Matlab/Simulink.....	111
Figura 53 - Resultado de simulação da curva de potência do painel KC130T da Kyocera...	114
Figura 54 - Simulação da curvas características do painel fotovoltaico KC130T do fabricante Kyocera. (a) e (b) modelo simulado; (c) e (d) curvas características do <i>data-sheet</i> do Anexo3.	115
Figura 55: Simulação do MPPT através do método $P\&O$ por I_{Lref} com variação não abrupta de irradiação solar e temperatura ambiente.	118
Figura 56: Circuito Matlab/Simulink para a configuração <i>Multi-String</i>	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Módulos fotovoltaicos comerciais com maior eficiência.	35
Tabela 2: Características elétricas do módulo BP Solar SX3200.....	43
Tabela 3: Regras Fuzzy para o método de inferência de I_{pv}	78
Tabela 4: Tabela da base de regras para MPPT Fuzzy através de dD	85
Tabela 5: Potências em VA no conversor <i>Boost</i> de acordo com cada método MPPT.	93
Tabela 6: Características elétricas do módulo KC130TM - Kyocera.....	112
Tabela 7: Dependência do fator A de acordo com a tecnologia da célula	113

LISTA DE ABREVIATURAS

BP – Empresa multinacional que produz módulos solares

F_F – Fator de suprimento (*Fill Factor*)

G_0 – Irradiação solar Global, [W/m^2]

I-V – Corrente-Tensão

M_p – Número de módulos fotovoltaicos em paralelo

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

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

M_s – Número de módulos fotovoltaicos em série

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

N_p – Número de células fotovoltaicas paralelo

N_s – Número de células fotovoltaicas em série

PV – Fotovoltaico (*Photovoltaic*)

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

RMS – *Root Mean Square*.

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

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A – Ampère

Ah – Ampère-hora

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

D – *Duty cycle*

SOC – Estado de carga

FC – Fator de capacidade

h – Hora

i – Corrente

PV – Fotovoltaico

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt-hora

kWp – Quilowatt-pico

m – Metro

m/s – Metro por segundo

m² – Metro quadrado

MA – Massa de ar

MW – Megawatt

MWh – Megawatt-hora

Ω – Ohm

PC – Potência crítica

PD - Profundidade de descarga

PI – proporcional integral

s – Segundo

V – Volt

VA – Volt-ampère

W – Watt

W/m² – Watt por metro quadrado

Wh – Watt-hora

eV – Elétron volt

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	MOTIVAÇÃO E ESTADO DA ARTE	21
1.1	Motivação	21
1.2	Estado da arte de modelos MPPT baseados em Lógica Fuzzy.....	23
1.3	Objetivos.....	27
1.4	Organização da dissertação	28
2	MODELAGEM DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS.....	29
2.1	Descrição geral de uma célula fotovoltaica	29
2.2	Tipos de células fotovoltaicas	31
2.2.1	Silício monocristalino.....	31
2.2.2	Silício multicristalino	32
2.2.3	Silício amorfo	32
2.2.4	Outras classificações de células solares	32
2.2.5	Células solares com multi-junção.....	34
2.3	Modelagem de uma célula solar	35
2.4	Módulos solares	39
2.5	Modelo de um Arranjo fotovoltaico.....	41
2.6	Curvas características simuladas de um módulo solar	43
2.6.1	Ponto de potência máxima	44
2.6.2	Parâmetros de painéis solares.....	45
2.6.3	Fatores que influenciam no desempenho	46
3	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	48
3.1	Topologia de conversores fotovoltaicos	48
3.1.1	Configuração centralizada.....	49
3.1.2	Configuração <i>string</i>	50
3.1.2.1	Conceito de Equipe	51
3.1.3	Configuração <i>multi-string</i>	52
3.2	Futuro dos conversores fotovoltaicos	54

3.3	Configuração do sistema isolado para este estudo	55
3.3.1	Uso de conversores CC-CC	57
3.3.1.1	O Conversor <i>Boost</i>	57
3.3.2	Banco de baterias	61
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	64
4.1	Sistema fotovoltaico em operação sem MPPT	65
4.2	O Método MPPT através da Perturbação e Observação do sistema	66
4.3	Métodos MPPT através da Lógica Fuzzy	73
4.3.1	Lógica Fuzzy	73
4.3.2	Estimador Fuzzy de MPPT por inferência de corrente PV	76
4.3.3	MPPT através do método Fuzzy por inferência do ciclo de trabalho	81
4.4	Análise comparativa da corrente <i>RMS</i> e da potência em VA	91
4.5	Sistema <i>multi-string</i>	94
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	98
5.1	Conclusões	98
5.2	Trabalhos Futuros	99
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – Circuito Equivalente de uma Célula Solar para o <i>Simulink</i>	111
	APÊNDICE B – Ajuste do modelo do painel para representar módulos comerciais	112
	APÊNDICE C – Defuzificação pelo Método do Centróide	116
	APÊNDICE D – MPPT pelo método <i>P&O</i> com variação não abrupta de G_a e T_a	117
	APÊNDICE E – Circuito <i>Matlab/Simulink</i> para a Configuração <i>Multi-String</i>	119
	ANEXO 1 – <i>Data-sheet</i> do Painel Solar BPSolar SX3200	121
	ANEXO 2 – <i>Data-Sheet</i> da Bateria EPOCH E1-12-40 Fabricado por Valence	124
	ANEXO 3 – <i>Data-sheet</i> do Painel Solar KC130TM do fabricante Kyocera	127

INTRODUÇÃO

A ENERGIA renovável é a energia proveniente de recursos naturais tais como sol, vento, recursos hídricos e oceânicos, e que tem a característica de ser naturalmente reabastecida e limpa. Os geradores fotovoltaicos, aerogeradores, entre outros, podem ser associados a outras fontes renováveis, de mesmo tipo ou não, em operação isolada ou conectada à rede de distribuição. Esses sistemas podem ser configurados de acordo com as necessidades específicas para satisfazer a demanda energética de uma região, de modo que se ajuste à geografia local e outras especificidades (HAUSCHILD, 2006) (EL-AAL, 2005) e (ESTEFEN, 2009). No caso das cargas ou consumidores estarem próximos à estação de geração, o sistema de energia é, então, chamado de distribuído ou disperso.

Cada tecnologia de energia renovável está num diferente estágio de evolução e pesquisa, e todas apresentam diferentes perspectivas futuras em relação ao custo, base industrial, melhorias de desempenho energético e potenciais impactos ambientais (BULL, 2002).

Os primeiros sinais de aumento de preço do petróleo (de 11% a 12% por ano) no início da década de 70, aliado a crescente demanda por energia elétrica, pressionaram os governos de diversos países por soluções para o aumento da potência instalada dos sistemas de energia (BP Solar USA, 2008). A partir daquela época, várias das soluções adotadas, por serem consideradas mais viáveis sob o ponto de vista técnico e econômico, apontaram para o aumento na instalação de novas usinas hidrelétricas, nucleares e termoelétricas. Porém, essas soluções, por causarem um grande impacto ambiental, em função dos danos a flora e a fauna, foram sendo cada vez mais difíceis de serem implantadas, ou mesmo inviabilizadas, devido às pressões políticas e sociais. Atualmente no Brasil, embora a descoberta de novos poços de petróleo e, mais recentemente, da camada pré-sal, já é amplamente reconhecido que estas fontes são esgotáveis e de alto custo de comercialização e que, da sua utilização, é produzida alta emissão de poluentes. Há, portanto, o interesse por parte de alguns órgãos governamentais pelo aumento da potência instalada a partir de fontes renováveis.

Assim, enquanto que a solução adotada na formação das matrizes energéticas, para o abastecimento dos grandes centros urbanos, foi a geração centralizada associada a longas linhas de transmissão, o atendimento às comunidades localizadas em regiões rurais ou remotas continua a ser um desafio até os dias atuais. Esse tipo de comunidade apresenta baixa densidade populacional, o que geralmente acarreta um perfil de carga irregular com baixa demanda. Essas características, unidas às longas distâncias para o acesso ao sistema elétrico, inviabilizam economicamente projetos tradicionais, contribuindo dessa maneira para o desenvolvimento de sistemas de energia elétrica isolados. Uma das soluções mais frequentes, para fornecer eletricidade a essas áreas, tem sido o uso de geradores diesel que tem baixo custo de investimento, mas elevado custo de operação e manutenção. Por conseguinte, é comum que ocorra o super-dimensionamento desses sistemas, com a instalação de múltiplos geradores diesel, a fim de compensar os períodos de pico, causando baixa eficiência e maiores custos de manutenção. Além disso, os ruídos de operação e a emissão de poluentes acarretam graves conseqüências para as condições socioambientais. Em face de todos esses problemas, o interesse por fontes de energia renováveis torna-se cada vez mais evidente.

Por outro lado, há países com alta densidade populacional e de baixo poder aquisitivo, com pouco ou nenhum recurso energético hídrico ou fóssil. O desenvolvimento dessas populações é prejudicado pela grande dependência de importação de combustíveis fósseis tais como carvão e diesel. Neste contexto situa-se Cabo Verde, que é um país africano de desenvolvimento médio, sem grandes recursos naturais geradores de riqueza. Neste país existe uma grande preocupação do governo quanto à construção de um futuro sem dependência de combustíveis fósseis, face aos sucessivos aumentos do preço do petróleo. Atualmente 97% do seu consumo de energia é baseado em geradores diesel (ELECTRA, 2008). Neste contexto, o governo traçou uma ambiciosa meta: garantir que, até 2020, 50% da matriz energética de Cabo Verde seja proveniente de fontes renováveis e que, pelo menos, uma de suas ilhas esteja 100% abastecida por energia renovável (NEVES, 2008). Hoje, nesse país, apenas 2% de energia são provenientes de fontes de energia renováveis (ELECTRA, 2008). Por esse motivo há interesse, por parte do governo, em formar pessoal capacitado para atuar nesse mercado, e em incentivar projetos nesta área.

Segundo o relatório anual da REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*) de 2007 (REN21, 2007), o uso de fontes de energia renovável oferece ao nosso planeta a possibilidade de redução das emissões de carbono, tornando o ar mais limpo. Além disso, proporciona aos países em todo o mundo a oportunidade de melhorar a sua segurança energética e impulsionar o desenvolvimento econômico numa base mais sustentável.

Durante os últimos cinco anos, houve uma mudança de paradigma nos setores industriais e comerciais quanto à inserção no mercado das tecnologias de fontes renováveis que, no passado, eram consideradas de muito alto custo. Houve um progresso notável deste mercado, muito impulsionado pelas políticas no setor energético em vários países, tais como Alemanha, Dinamarca e Espanha, que incentivam a ampla comercialização dessas tecnologias. As indústrias deste setor têm crescido a taxas de 20% a 60% ao ano (REN21, 2007), captando o interesse de grandes empresas multinacionais. Só em 2007, mais de 100 bilhões de dólares foram investidos em ativos de produção de energia renovável, manufatura, pesquisa e desenvolvimento, o que é um verdadeiro marco global (REN21, 2007). Neste cenário, destaca-se o crescimento no uso de painéis solares fotovoltaicos (PV), que vem ganhando popularidade por conta de grandes avanços tecnológicos na área e consequente redução de preço, adicionado a grande modularidade que facilita a utilização em residências.

No início da década de 80, as indústrias fotovoltaicas atraíram o interesse de grande parte das companhias de energia e agências governamentais. Com grande investimento de capital, assistiu-se a uma tremenda aceleração no desenvolvimento de módulos fotovoltaicos.

Atualmente, a energia solar fotovoltaica conectada à rede de distribuição é a forma de energia que mais cresce. Esse crescimento se dá a uma taxa de 70% ao ano, em nível mundial, apresentando 13 GW de capacidade instalada. Em 2008 houve um aumento da produção industrial de módulos solares de cerca de 90% em relação a 2007, o que correspondeu a uma produção de 6.9 GW somente em 2008 (REN21, 2009).

Segundo o relatório da Comissão de Energia da Califórnia, dos quase 30 GWh produzidos em 2002, 11,0% foram gerados por fontes renováveis. O estado pretende ter até 20% da sua energia a partir de fontes renováveis até 2017. Dentre as fontes de energia renovável, a energia solar é especialmente atraente, pois a Califórnia tem alta incidência de irradiação solar na maior parte do ano. Neste caso, a preocupação maior é com a redução de emissão de poluentes, dado que a estratégia é aumentar o consumo de energia solar durante o período diurno, deixando as outras fontes de energia, incluindo os combustíveis fósseis, para a noite e para os poucos dias de chuva, a fim de que o uso desses combustíveis possa ser gradualmente reduzido (YANG CHEN, SMEDLEY, 2004).

O preço do módulo PV foi, no passado, a maior contribuição para o custo de um sistema de energia solar fotovoltaico. Existe uma tendência de redução no preço dos módulos PV, que se deve a um grande aumento na capacidade de produção (KJAER, PEDERSEN, BLAABJERG, 2005) e nos investimentos em pesquisa. Isto é observado pelas pesquisas sobre células fotovoltaicas na área de Nanotecnologia.

Para competir no mercado com outras formas de combustível fóssil, estima-se que o custo de produção de um módulo PV deverá ser de aproximadamente 1 dólar por watt. Este preço é chamado paridade da rede (*grid parity*), que é o ponto em que a energia fotovoltaica tem um custo igual ou menor do que a energia fornecida pela rede de distribuição. Pelo menos até 2008, 80 empresas ao redor do mundo estavam perseguindo esta meta (STEVENSON, 2008). O fabricante First Solar anunciou, em Fevereiro de 2009, ser a primeira empresa a romper a barreira do \$1 dólar por Watt, reduzindo o custo de fabricação para módulos solares de Telureto de Cádmio (CdTe) no quarto trimestre de 2008 para 98 centavos de dólar por Watt (FIRST SOLAR, 2009). Como o custo total também tem que refletir a vida esperada dos módulos, o produto da First Solar deverá durar pelo menos 25 anos depois dos quais os materiais serão devolvidos à companhia para reciclagem (STEVENSON, 2008). Além de ajudar o meio ambiente, a reciclagem proveria matéria prima para a First Solar, embora depois de uma longa espera.

Quando conectado à rede de distribuição, a geração de energia a partir de painéis solares fotovoltaicos pode ser usada, tanto para reduzir a dependência em energia de fontes não renováveis, como também para servir como fonte auxiliar a fim de suprir parte da demanda em caso de períodos de pico ou de falta de energia na rede de distribuição (TIRUMALA *et al.*, 2002).

Capítulo 1

MOTIVAÇÃO E ESTADO DA ARTE

1.1 Motivação

O desenvolvimento da eletrônica de potência nas últimas décadas em termos do aumento da capacidade de potência das chaves semicondutoras, tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e MOSFET (*Metal Oxide Field Effect Transistor*), aliado ao fato da tendência à redução de custos dos painéis solares e a característica modular dos mesmos, tem motivado a pesquisa e o desenvolvimento de novas topologias de conversores, novas configurações de sistemas, e seus controles.

Diversos trabalhos têm sido publicados na área de energias renováveis demonstrando o interesse em se estudar a viabilidade técnica e econômica de fontes renováveis, que incluem fonte solar, para solução de problemas no fornecimento de energia, tais como apresentados em (LOPEZ *et al.*, 2007) (SONI, OZVEREN, 2006) (MBOGHO *et al.*, 1996) (EL-SHATER, 2002). Nestes trabalhos, são mostrados resultados por simulação digital baseados em modelos extremamente simplificados, tipo diagramas em blocos onde, na maioria dos casos, não é dado destaque aos componentes de circuitos tais como, resistores, capacitores, indutores e chaves semicondutoras de potência. Além disso, não apresentam informações quanto à modelagem dos painéis solares. Portanto, esses trabalhos apresentam maior foco no planejamento para implantação e operação de sistemas de potência.

É fundamental o controle de tensão e corrente de qualquer fonte de energia com a finalidade de mantê-los nos níveis adequados a cada aplicação. No caso de energia solar, é comum o uso de conversores do tipo CC-CC, seja para o ajuste dos níveis da tensão fornecida pelos painéis a um barramento CC adequado a uma aplicação específica, seja para o controle de máxima potência fornecida pelos painéis, ou ainda para a conexão aos componentes armazenadores de energia, tais como baterias. Esses componentes armazenadores são muito

importantes por causa da intermitência quanto ao fornecimento da energia, devido às variações climáticas.

Apesar do rápido desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica e das crescentes demandas por novos materiais PV que tem conduzido a uma redução dos custos dos módulos, os custos de sistemas fotovoltaicos ainda são elevados. Portanto, há uma necessidade para a concepção de conversores de potência que não são apenas de alta eficiência, mas também capazes de otimizar a produção de energia do material fotovoltaico.

Os painéis solares podem funcionar em vários pontos de operação definidos pela sua curva característica de tensão-corrente. Se o mesmo for ligado a uma carga que não consome toda a energia disponível, neste caso o painel estará operando num ponto abaixo da sua capacidade máxima, desperdiçando energia. Por isto, para obter-se máxima eficiência, torna-se necessário agregar estratégias de controle capazes de manter o painel funcionando no seu ponto de potência máxima (*Maximum Power Point* – MPP).

Muitos têm sido os trabalhos publicados sobre controle para rastreamento do ponto de potência máxima (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) que tem um papel importante na complexidade, desempenho e custo de todo o sistema.

Esses métodos que podem ser encontrados na literatura (FARANDA, LEVA, MAUGERI, 2008) apresentam as seguintes principais preocupações: simplicidade de concepção, aplicação prática e eficiência de rastreamento para um determinado conjunto de condições de operação. Por este motivo há uma grande preferência pela implementação desses controles em dispositivos microcontrolados, tais como os processadores digitais de sinais (*Digital Signal Processor* – DSP), devido à praticidade para introduzir diferentes funcionalidades nos controles.

Entre os MPPTs encontra-se alguns métodos tradicionais tais como o da Perturbação e Observação (*Perturb and Observe* - P&O), o da condutância incremental (*Incremental conductance*), o método através da relação entre a tensão no MPP com a tensão de circuito aberto (kV_{oc}) ou em relação à corrente de curto circuito (kI_{sc}) no MPP (FARANDA, LEVA, MAUGERI, 2008), que são populares devido à simplicidade da sua estrutura de controle. No entanto, apresentam inúmeros problemas tais como flutuações em torno do ponto máximo, resposta lenta para rápidas mudanças no tempo, rastreamento não eficiente devido a parâmetros fixos, etc.

Neste cenário, sistemas de controle baseados na Lógica Fuzzy têm se tornado cada vez mais atraentes por apresentar maior flexibilidade para desenvolvimento de controladores

eficientes, devido às dificuldades em se obter o modelo matemático da planta a ser controlada, e por apresentarem a capacidade de tratar com as imprecisões e com sistemas não-lineares.

Aplicar técnicas de inteligência artificial (ou sistemas inteligentes) baseados na Lógica Fuzzy para rastreamento do ponto de máxima potência e realizar estudos comparativos com técnicas tradicionais de rastreamento do ponto de máxima potência, e ainda simular um sistema *multi-string* são os pontos de maior foco deste trabalho.

Uma das preocupações do presente estudo é avaliar, além da capacidade de rastreamento do ponto de máxima potência, o impacto sobre os níveis das correntes dos dispositivos. Este aspecto é particularmente importante para o dimensionamento dos componentes do projeto e considerações sobre perda de energia nos dispositivos de potência. Muito poucos trabalhos têm abordado esse assunto (TSE *et al.*, 2004).

Em todos os sistemas de energia solar, simulações de painéis fotovoltaicos são necessárias antes de qualquer verificação experimental. Portanto, há necessidade de se desenvolver um modelo do circuito PV que possa ser utilizado em quaisquer estudos de simulação de sistemas de energia solar. Para que se possam avaliar as perdas nos dispositivos de potência, é importante que o modelo PV seja capaz de reproduzir as curvas características de painéis comerciais de qualquer fabricante com maior fidelidade possível, simulando um comportamento real, de forma que os resultados sejam mais próximos do que ocorreria na prática.

1.2 Estado da arte de modelos MPPT baseados em Lógica Fuzzy

Os algoritmos MPPT podem ser classificados em três categorias principais: algoritmos baseados em modelo, algoritmos baseados em treinamento e algoritmos de busca (ELGENDY, ZAHAWI, ATKINSON, 2008). Dentro desta classificação surgiram diversas contribuições envolvendo modelo de controladores Fuzzy com vários níveis de complexidade, velocidade de rastreamento e precisão, refletindo no seu desempenho.

Algoritmos MPPT baseados em modelo referem-se aos que usam qualquer modelo matemático, ou tabelas com alguns pontos de operação (*lookup tables*), para calcular a tensão PV no ponto de máxima potência e/ou a corrente PV nesse mesmo ponto. Neste caso, a obtenção de parâmetros precisos do modelo do gerador fotovoltaico é difícil, além de ser um processo demorado que depende de cada tipo de painel. Alternativamente, podem ser utilizados modelos aproximados em que se atribui um valor constante ao MPP do gerador

fotovoltaico, quer através da relação entre a tensão no MPP com a tensão de circuito aberto (kV_{oc}), ou em relação à corrente de curto circuito (kI_{sc}) no MPP. Geralmente, este tipo de rastreamento se estabelece em malha aberta.

Como exemplo de controlador Fuzzy baseado em modelo, pode-se apontar (MASHALY *et al.*, 1993) que estabelece um polinômio de segundo grau para o cálculo *off-line* da potência máxima de referência em função da variação da irradiação solar, considerando a temperatura constante. A saída Fuzzy é a variação da tensão de referência para a célula, havendo necessidade de se adicionar ao sistema um controlador PI. (YU *et al.*, 1996) utiliza a variação da irradiação solar para criar um polinômio de tensão ótima para MPP ao invés de polinômio de potência, com e sem compensação de temperatura. Foi observado que o rastreamento correto deve considerar a variação da temperatura. Através de procedimentos heurísticos, (REIS, 2002) estabelece um polinômio para curva característica (I-V) de um conjunto de painéis fotovoltaicos conhecidos, que será usado para cálculo do ponto de potência máxima. O polinômio por si só não representa as variações da curva I-V de acordo com a variação das condições meteorológicas. Para isso foi utilizado um fator de correção para modelar a influência da temperatura ambiente. A potência máxima calculada pelo polinômio é comparada com a potência da carga resultando em um erro de potência. Este erro e sua variação são as entradas do controlador Fuzzy, sendo que a saída é um valor fixo do ciclo de trabalho do conversor CC-CC que deverá conduzir o sistema ao MPP. Em todos esses casos, observa-se que o controle é sensível à forma como o polinômio, que representa o deslocamento de tensão ou potência PV, foi modelado. Nota-se que não se admite mudança na planta a ser controlada. Para cada planta PV um novo polinômio deverá ser modelado.

Algoritmos MPPT baseados em treinamento (Inteligência Artificial) que incluem Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais podem necessitar de conhecimento de especialistas ou formação prévia de uma base de dados e exigem alta velocidade e Microcontroladores com grande capacidade de memória para a sua implementação aumentando o custo total do sistema. Dependendo do ajuste e da disponibilidade de dados estes algoritmos podem ser mais eficientes do que os baseados em modelo. O modelo Fuzzy proposto por (VEERACHARY, SENJYU, UEZATO, 2002) é não-linear e adaptativo por natureza, o que lhe confere um desempenho robusto sob variação dos parâmetros de controle: distúrbios na tensão PV e na carga. É usada uma Rede Neural Artificial para realizar o treinamento do ajuste da saída Fuzzy de tal forma que a tensão do arranjo PV estimada (tensão de referência) é idêntica ou igual à tensão PV real no MPP (tensão ideal). Este processo é repetido até que o erro dos vetores no conjunto de treinamento seja reduzido para um valor aceitável. Se houver

mudanças na insolação, então a tensão do arranjo PV ideal também muda. Portanto, uma estimativa *online* da tensão ideal (ao invés do *off-line* proposto) é necessária para rastrear o MPP. Em (PATCHARAPRAKITI, PREMRUDEEPREECHACHARN, 2002) em que o sistema PV é conectado à grade, o treinamento é feito pela Lógica Fuzzy. Os resultados da simulação mostraram que a vantagem deste sistema é a adaptação dos parâmetros Fuzzy para uma resposta rápida, um bom desempenho no transitório, insensível às variações de perturbações externas. Segundo os autores, o resultado da simulação mostrou ainda que os controladores MPPT que usam a lógica Fuzzy adaptativa extraem mais potência do que o controle Fuzzy convencional. Este sistema também pode fornecer energia para a rede com baixo nível de harmônico e alto fator de potência.

Algoritmos de busca, incluindo o *Perturb and Observe*, o *Incremental Conductance* e métodos de busca baseados em Lógica Fuzzy medem a corrente e a tensão PV para calcular a potência do arranjo ou do conversor eletrônico a ele conectado. Em seguida utiliza os valores dos parâmetros medidos para determinar se deve incrementar ou decrementar o parâmetro de controle de acordo com o valor do erro calculado. O parâmetro de controle pode ser uma tensão ou corrente de referência para a tensão ou corrente de saída do arranjo fotovoltaico para operação no ponto de máxima potência ou pode ser a variação do *duty cycle* de um chaveamento PWM, tensão ou corrente PV no MPP.

(GOMARIZ *et al.*, 1997) considera apenas três e dois conjuntos Fuzzy para o erro e sua variação, respectivamente, que constituem as entradas do controlador Fuzzy. A resposta é uma variação do tempo em que a chave do conversor CC-CC permanece ligada. Neste caso o controle opera como um PI em regiões não lineares. Mais conjuntos foram introduzidos de forma a melhorar a representação do universo de discurso (entradas do sistema Fuzzy), que neste caso são variáveis relacionadas ao comportamento da curva característica do painel solar. Em (D'SOUZA, LOPES, XUEJUN LIU, 2005) o erro é calculado pela diferença entre a potência do painel solar dividido pela diferença da corrente PV do instante anterior e a corrente no instante atual. A saída Fuzzy é uma corrente de referência do painel para a operação em MPP. Desta forma pode-se notar que este trabalho propôs o uso da lógica Fuzzy para o algoritmo MPPT *P&O* (TAN, GREEN, HERNANDEZ-ARAMBURO, 2005) com controle de corrente de pico com amostragem instantânea. Com as mesmas variáveis de entrada, (XIAO-BO LI, KE DONG, HAO WU, 2008) utiliza um controle adaptativo onde uma constante alfa é multiplicada aos parâmetros do controlador Fuzzy com o objetivo de aumentar a velocidade de rastreamento. Neste caso a saída é o ciclo de trabalho do conversor elevador (*Boost*). Apesar dos conversores elevadores apresentarem maiores vantagens para a

realização do MPPT (GLASNER, APPELBAUM, 1996), outros conversores podem ser usados como é o caso do conversor *Cûk* em (MAHMOUD *et al.*, 2000) e o conversor abaixador (*Buck*) em (ALTAS, SHARAF, 2008). O algoritmo de rastreamento do MPP pode também ser aplicado em um inversor à tiristores como é feito em (GOUNDEN *et al.*, 2009). A potência de referência máxima neste caso é calculada com base em tensão de circuito aberto e corrente curto-circuito do arranjo PV. O erro entre a potência real e a potência de referência é usado para modular o ângulo de disparo do inversor por comutação de linha de modo que a potência máxima é fornecida à rede de distribuição. O conversor utilizado introduziu alto nível de harmônico de corrente que foi minimizado com o uso de três bancos de capacitores. O ângulo de disparo fica reduzido proporcionalmente ao valor de sombreamento do arranjo PV.

O erro também pode ser calculado pela diferença entre a potência do painel solar dividido pela diferença da tensão PV do instante anterior e a tensão PV no instante atual, como acontece em (KHAEHINTUNG *et al.*, 2004) (KHAEHINTUNG, PRAMOTUNG, SIRISUK, 2004) (KHAEHINTUNG *et al.*, 2005) (KHAEHINTUNG, SIRISUK, 2007). Em todos estes casos foi possível uma implementação em *hardware* onde as entradas e saídas do controle Fuzzy foram armazenadas na memória de uma *look-up table* de um microcontrolador de baixo custo.

Alguns autores utilizaram variações do algoritmo Fuzzy convencional ou sua fusão com outras técnicas. É o caso do Modelo de Regressão Fuzzy usado em (EL-SHATER, 2002), e Redes Cognitivas Fuzzy usado em (KHAEHINTUNG, SIRISUK, KUNAKORN, 2005) e (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006). As redes cognitivas Fuzzy constituem uma extensão dos mapas cognitivos Fuzzy, de modo que eles são capazes de operar em contínua interação com o sistema físico que elas representam. Ao mesmo tempo, são capazes de manter vários pontos de equilíbrio operacional que atendem o sistema. Quando uma Rede Cognitiva Fuzzy é adequadamente concebida, elas podem acelerar o processo de atingir o ponto de máxima potência. Os Controladores Fuzzy auto-organizáveis (*Self-Organizing Fuzzy Logic Controller*) apresentados em (KHAEHINTUNG *et al.*, 2005) também podem ser empregados para realizar o MPPT. A expressão “organização” significa que o controlador pode recursivamente ajustar as suas regras Fuzzy associadas de acordo com a resposta desejada. Em (KUANG-YOW LIAN, YA-LUN OUYANG, WEI-LUN WU, 2008) o controle é projetado através de um modelo matemático teórico de técnicas de controle *Takagi-Sugeno* Fuzzy (TS Fuzzy) incluindo o uso de variáveis virtuais. Foram introduzidas técnicas sofisticadas para lidar com o modelo complexo e dinâmico do painel. Após uma série de

tratamentos, todas as variáveis foram definidas e puderam ser implementadas. O método TS Fuzzy pode conseguir um bom desempenho. No entanto, o desempenho pode ser melhorado se a variação da irradiação solar e temperatura ambiente forem consideradas na modelagem.

Os algoritmos de busca não exigem conhecimento prévio das características do gerador fotovoltaico, mas podem ser significativamente afetadas pelos valores escolhidos das variáveis de controle envolvidas, o valor do elo CC, a capacitância do conversor, a frequência de chaveamento, e o tamanho do passo de cálculo usado na mudança da variável de controle (ELGENDY, ZAHAWI, ATKINSON, 2008). O tipo de controle Fuzzy escolhido para o rastreamento do MPP, associado à escolha adequada dos parâmetros envolvidos, determinam a eficiência global do controle, bem como a complexidade quanto a sua implementação prática.

1.3 Objetivos

Os objetivos desta dissertação, além de aprofundamento dos estudos em relação aos problemas de sistemas de geração e controle que utilizam energias renováveis, são:

- Investigar e estudar o modelo de uma célula solar para geração de energia fotovoltaica;
- Implementar o modelo do painel solar no MATLAB/Simulink;
- Realizar simulações de métodos *MPPT* através do algoritmo *Perturb and Observe*;
- Realizar simulações de métodos *MPPT* através de técnicas baseadas na Lógica Fuzzy;
- Realizar um estudo comparativo entre os métodos *MPPT* baseados na Lógica Fuzzy e o método *MPPT* tradicional *Perturb and Observe*, quanto aos níveis de corrente eficazes e potência em VA nos dispositivos de potência, parâmetros esses que são importantes para o dimensionamento e avaliação das perdas no conversor. Serão comparados ainda, a velocidade e a capacidade de rastreamento de cada método.
- Simular um sistema PV *multi-string* isolado, com *MPPT* individualizado por conversor, baseado na Lógica Fuzzy.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos nos quais os assuntos pertinentes a cada um deles serão abordados conforme descrito a seguir.

No Capítulo 2 serão apresentados os principais conceitos de células fotovoltaicas: a descrição geral, o princípio de funcionamento, algumas classificações e a modelagem matemática de painéis fotovoltaicos.

As configurações dos sistemas fotovoltaicos são apresentadas no Capítulo 3. Ainda serão apresentadas as topologias de conversores PV e a configuração do sistema isolado *multi-string*, objeto deste estudo.

No Capítulo 4 é feita a modelagem dos sistemas de controle para rastreamento do ponto de máxima potência através do método *Perturb and Observe* e através de controladores baseados na Lógica Fuzzy. Após a modelagem são discutidos os resultados obtidos nas simulações, para cada situação, e destacados os pontos objetivos do trabalho.

Por fim, no Capítulo 5, conclui-se sobre os pontos principais do trabalho e propõem-se sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

MODELAGEM DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

NESTE capítulo será apresentado o modelo de um arranjo de painéis solares desenvolvido no programa de simulação Matlab/*Simulink*. Nas Seções 2.1 e 2.2, serão respectivamente apresentadas algumas considerações preliminares sobre o funcionamento de uma célula solar, e sobre alguns tipos de células solares disponíveis no mercado. Nas Seções 2.3 a 2.5, serão apresentados em seqüência os passos de desenvolvimento do modelo de uma célula, de um módulo e de um arranjo de painéis. E na Seção 2.6, serão mostrados os resultados de simulação de um módulo solar comercial, com o qual baseou-se para formar o arranjo de painéis utilizado nas simulações apresentadas no Capítulo 4.

2.1 Descrição geral de uma célula fotovoltaica

As células fotovoltaicas convertem radiação solar diretamente em energia elétrica CC. A Figura 1 mostra o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica que é baseado no fenômeno denominado **efeito fotovoltaico**, descoberto em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel (RAZYKOV, 2003). Chama-se efeito fotovoltaico, o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor produzida pela absorção da luz. Toda a radiação eletromagnética, incluindo a luz, é quantizada em partículas chamadas fótons, isto é, a menor porção de radiação eletromagnética que pode existir é um fóton. A luz visível, do Sol, é comumente uma mistura de muitos fótons de diferentes comprimentos de onda.

A fim 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* (Figura 1). 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). Isto cria, em essência, uma lacuna (ou buraco) 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. Este processo é repetido infinitas vezes até que uma corrente elétrica seja estabelecida (LORENZO *et al.*, 1994). Neste ponto, 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.

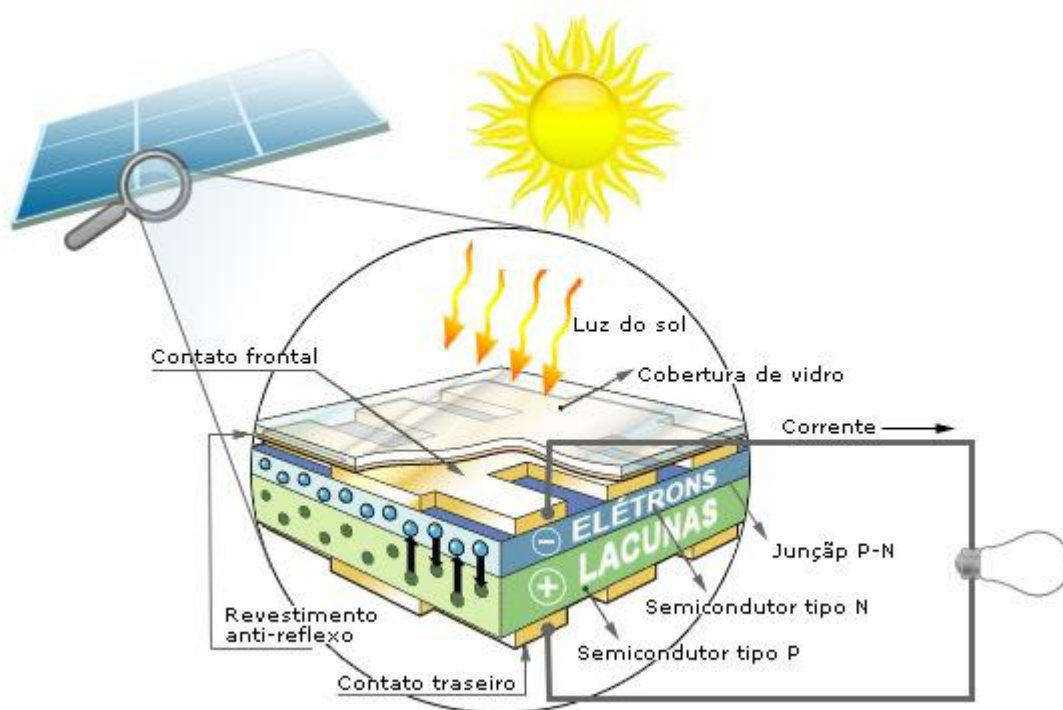


Figura 1: Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Uma célula solar típica tem na sua estrutura as seguintes camadas:

- Capa de vidro - camada de vidro que fornece proteção contra os elementos exteriores.

- Revestimento anti-reflexo - 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 frontal - transmite a corrente elétrica.
- Semicondutor *tipo n* - fina camada, geralmente de Silício (Si) dopado, geralmente com Fósforo (P).
- Semicondutor *tipo p* - fina camada, geralmente de silício dopado, geralmente com Boro (B).
- Contato traseiro - transmite a corrente elétrica.

2.2 Tipos de células fotovoltaicas

Por causa da extensa investigação sobre a energia solar, há muitos tipos de células solares no mercado. Todas elas seguem os princípios descritos quando se trata de gerar uma corrente elétrica. No entanto, muitas abordagens diferentes estão sendo usadas para criar as estruturas, a fim de reduzir os custos de produção e aumentar a eficiência (STEVENSON, 2008). As abordagens mais comuns, quanto ao tipo de tecnologia usado na produção de células fotovoltaicas são: silício monocristalino, silício multicristalino (ou policristalino), Silício amorfo (RAZYKOV, 2003).

2.2.1 Silício monocristalino

Este tipo de painel solar utiliza células feitas a partir de um único cristal extremamente puro tornando-o mais eficiente. O que significa que é o tipo de célula solar mais caro para produzir. O seu desempenho é um pouco melhor em condições de baixa luminosidade.

Surgiu recentemente no mercado um novo tipo de painel solar denominado de Silício Monocristalino Bifacial (KRANZL *et al.*, 2006), que utiliza células solares monocristalinas, com cobertura de vidro nas duas faces para que possa coletar energia de ambos os lados do painel solar (DEL CANIZO *et al.*, 2001). Ao coletar a luz em ambos os lados, o painel bifacial terá maior eficiência em relação aos monocristalinos simples para aproximadamente o mesmo custo. Esta alternativa é uma forma da utilização mais eficiente que faz com que o custo dos painéis versus o custo do sistema de monitoramento seja diminuído.

2.2.2 Silício multicristalino

Neste caso, as células solares são construídas a partir de silício que pode conter muitos pequenos cristais. Este tipo de abordagem produz algum grau de degradação dos cristais de silício, que os torna menos eficiente. No entanto, este tipo de abordagem é mais fácil e mais barata para a fabricação (PONCE-ALCANTARA, DEL CANIZO, LUQUE, 2005).

A espessura do material de Si pode ser drasticamente reduzida, depositados em substratos de baixo custo, podendo ser fabricadas em módulos finos flexíveis de qualquer tamanho com estrutura integralmente interligada (RAZYKOV, 2003) (LUQUE, HEGEDUS, 2003) resultando num painel tipo uma película de silício multicristalino.

2.2.3 Silício amorfo

Painéis solares amorfos são feitos de filmes. Neste tipo de painéis, normalmente, o silício é espalhado diretamente sobre chapas finas de aço inoxidável. A célula solar tipo filme também podem ser espalhados em material plástico para fazer painéis solares muito flexíveis. Estes tipos de células solares são muito mais baratos, mas também muito menos eficientes do que os de silício mono ou multicristalino (RAZYKOV, 2003). Portanto, a fim de proporcionar o maior número watts como os outros tipos de painéis solares, estes devem ser muito maiores em tamanho.

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos consumindo pouca energia na produção e baixando ainda mais o custo. A desordem na sua estrutura o torna ainda menos eficiente do que os outros tipos de silício. Novas técnicas de fabricação e novos materiais vêm sido incorporados de forma a aumentar esta eficiência (HAMAKAWA, 1991) e por causa da alta flexibilidade tem revelado muito útil em certos tipos de aplicações.

2.2.4 Outras classificações de células solares

Outra maneira de olhar para células solares é em termos de tipos de materiais que são feitos. Dependendo da sua composição química ela pode pertencer a grupos que variam de I a IV da Tabela Periódica (RAZYKOV, 2003).

Atualmente existe uma grande quantidade de investigação orientada para a criação de células solares e painéis muito avançados. Estas células solares sofisticadas utilizam uma variedade de materiais com elevada eficiência de conversão da luz captando mais espectro.

Embora a tecnologia do silício cristalino seja o mais comumente utilizado como referência ou linha base para a tecnologia de geração elétrica solar, ocupando em torno de 90% das células solares existentes no mercado devido principalmente, a abundância de silício na terra, uma série de outros materiais podem ser utilizados como o Selênio, Arsenieto de Gálio, Arsenieto de Índio, Sulfeto de Cádmio, Telureto de Cádmio, Diseleneto de Cobre Índio Gálio (CIGS) (STEVENSON, 2008), (MICHAEL, UTSLER, 2005) (DEL CANIZO *et al.*, 2001) (KRANZL *et al.*, 2006) (ARUMUGHAN *et al.*, 2006) (RAZYKOV, 2003) (HE WANG, *et al.*, 2005) (WYRSCH *et al.*, 2006) (WRONSKI *et al.*, 2002) (NGWE SOE ZIN, *et al.*, 2008) (JEONG CHUL LEE *et al.*, 2005) (JAIN, 2003). Cada tecnologia de fabricação de células solares apresenta diferente taxa de conversão: película de silício amorfo: 6% a 7%; filme de Telureto de cádmio (CdTe): 8% a 10%; silício multi (ou poli) cristalino 12% a 15%; silício monocristalinos (SiN) 13% a 16% (BP Solar USA, 2008).

Apesar da maioria dos painéis fotovoltaicos comerciais terem hoje uma eficiência muito baixa, variando na faixa de 9 a 16 % (FIRST SOLAR, 2009), em Janeiro de 2009 foi atingida em laboratório uma eficiência de 41.1% para a conversão de luz solar em eletricidade. Para isso foi utilizado um sistema de painéis concentrados de Fosfato e Gálio e Índio (GaInP) e Arsenieto de Gálio e Índio (GaInAs) (FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, 2009).

A eficiência de uma célula fotovoltaica é determinada pela habilidade do material de absorver energia de fótons sobre uma área extensa, na *abertura da banda* do material (região entre a banda de valência e a banda de condução), é mostrada na equação 1.

$$\eta = \frac{\text{Potência elétrica na saída}}{\text{Energia solar sobre a célula}} \quad (1)$$

Além dos painéis solares fotovoltaicos planos, existem também os concentrados (RAZYKOV, 2003), (JAIN, 2003). Estes tipos de painéis empregam uma lente ou espelho para concentrar a energia do sol para as células solares individuais. Em teoria, esses tipos de painéis serão mais eficientes porque, concentrando a energia do sol, menos células solares são necessárias para criar a mesma quantidade de energia. Sua principal desvantagem é que

depende exclusivamente da luz direta para produzir eletricidade. Outra desvantagem é a complexidade da sua construção.

2.2.5 Células solares com multi-junção

Os dispositivos PV mais comuns utilizam uma única junção, ou interface, para criar um campo elétrico dentro de um semicondutor como visto na Figura 1. Em uma célula PV de junção única, apenas fótons cuja energia é igual ou superior à da lacuna pode liberar um elétron para o circuito elétrico. Em outras palavras, a resposta de células fotovoltaicas de junção única é limitada à porção do espectro do sol, cuja energia é superior à da lacuna da banda do material absorvente. Desta forma fótons de baixa energia não são utilizados (LUQUE, HEGEDUS, 2003). Uma forma para contornar essa limitação é usar dois (ou mais) diferentes células, com mais de uma banda e mais de uma junção, para gerar uma tensão (RAZYKOV, 2003), (JEONG CHUL LEE et al., 2005). Estes são referidos como células multi-junção (ou em cascata) (JAIN, 2003). Dispositivos multi-junção podem alcançar uma maior eficiência da conversão total, pois podem converter mais energia do espectro de luz em eletricidade (STEVENSON, 2008), (NGWE SOE ZIN, *et al.*, 2008). Estudos de otimização de junção tem sido realizados (MICHAEL, UTSLER, 2005) com vista a aumentar ainda mais esta eficiência.

A Figura 2 mostra um exemplo de um dispositivo multi-junção que usa Fosforeto de Gálio e Índio no topo da célula, um “diodo túnel”, que ajuda o fluxo de elétrons entre as células, e Arsenieto de Gálio na base da célula.

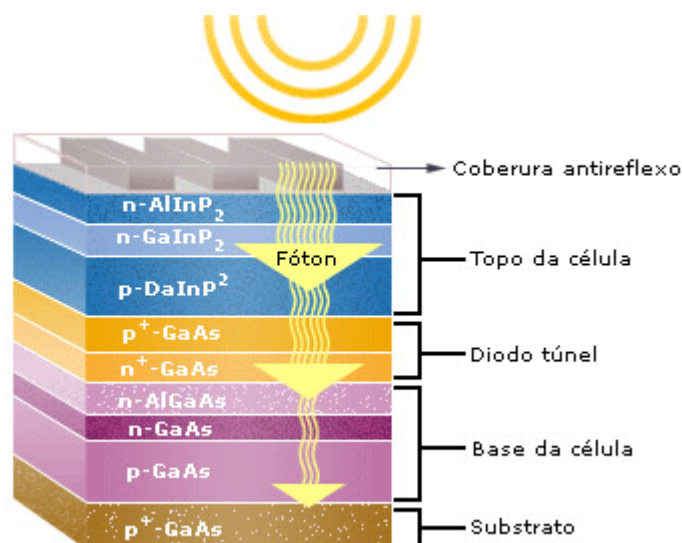


Figura 2: Célula solar com multi-junção.

Em geral, o estado de uma tecnologia de célula fotovoltaica depende da sua eficiência e custo industrial. A Tabela 1 apresenta informações sobre alguns módulos fotovoltaicos comerciais com maior eficiência no mercado, onde são indicadas as várias tecnologias comentadas na Seção 2.2.

Pode ser observado que, de forma geral, os painéis constituídos de células de um único cristal ocupam os primeiros lugares da tabela de eficiência enquanto que os de silício amorfo de junção única ou múltipla são as menos eficientes.

Tabela 1: Módulos fotovoltaicos comerciais com maior eficiência.

Fabricante	Modelo	Composição	Pot	ef %
Sun Power	SunPower315	Silício monocristalino	315	19.3
Sanyo	HIP-205BAE	Silício monocristalino	200	17.4
BP Solar	BP SX3200	Si multicristalino de alta eficiência	200	14.2
Sharp	Sharp U-175	Silício monocristalino	175	14.1
Advert Solar	Advent 180	Silício multicristalino (<i>non-stan</i>)	180	13.7
SolarWorld	Sunmodule 175	Silício monocristalino	175	13.4
First Solar	FS-277	Telureto de cádmio	77	10.8
Sharp	NA-901-WP	Silício amorfo /Silício nanocristalino	90	8.5
Uni-Solar	PVL 144	Silício amorfo 3-junções	144	6.7
Schott Solar	ASI-95	Silício amorfo 2-junções	95	6.6
Mitsubishi	MA100 T2	Silício amorfo 1-junção	100	6.3

Fonte: NREL (ROEDERN, 2009).

2.3 Modelagem de uma célula solar

Uma das principais características de um gerador fotovoltaico para o projeto elétrico é sua curva tensão-corrente (curva V-I). A modelagem deste gerador consiste na obtenção da curva V-I a partir do circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica. Para se realizar um estudo em ambiente de simulação a modelagem do painel solar se torna obrigatória.

Pelo menos existem três abordagens quanto aos circuitos elétricos que representam as células solares: o modelo empírico (ideal), o modelo de um diodo, e o de dois diodos (EL-AAL, 2005) (FREIRE, CARVALHO, 2000) (KHAEHINTUNG, PRAMOTUNG, SIRISUK, 2004) (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) (AZAB, 2008) apresentados na Figura 3.

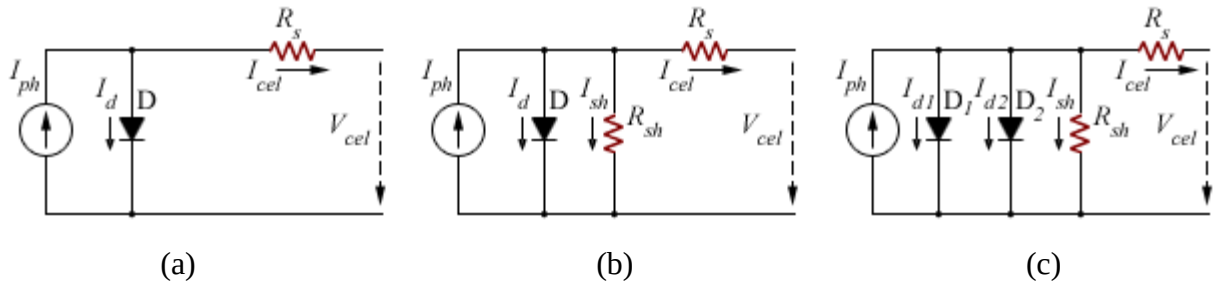


Figura 3 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica: (a) Modelo ideal, (b) Modelo de um diodo, (c) Modelo de dois diodos.

Grande parte das aplicações utiliza o modelo ideal (CAMPBELL, 2007) (ANDOUISI *et al.*, 2002) com ou sem resistência série, R_s . Outros utilizam o modelo de um diodo desprezando a resistência paralela (ou *shunt*), R_{sh} , como em, resultando no modelo ideal com R_s , devido à sua simplicidade de modelagem e implementação. No entanto, diferentes níveis de complexidade podem ser inseridos ou removidos do modelo trazendo como resultado comportamentos e performances variadas do modelo PV que se pretende estudar. A influência da temperatura ambiente (T_a) e o uso de um diodo de *bypass* são alguns exemplos.

Entre os circuitos elétricos equivalentes da célula solar, o mais aceito é o de um diodo, também conhecido como modelo real (ANDOUISI *et al.*, 2002), de complexidade moderada quando comparada aos demais e que será usado neste trabalho. Segundo (EL-AAL, 2005) a diferença nos resultados entre esses dois modelos é insignificativa. Isto se justifica se os parâmetros fornecidos em *data-sheets* de fabricantes de painéis fotovoltaicos forem incluídos na modelagem, como será mostrado neste trabalho.

São apresentadas diferentes abordagens e contribuições em (KHAEHINTUNG, PRAMOTUNG, SIRISUK, 2004) (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) (VALE *et al.*, 2004) e (RIMING SHAO, LIUCHEN CHANG, 2005) (LORENZO *et al.*, 1994) (LUQUE, HEGEDUS, 2003) (ANDOUISI *et al.*, 2002) (DIAZ-ESCOBAR, OLAVARRIETA, 2004) (YUSOF *et al.*, 2004) (DARLA, 2007) (WOLFS, QUAN LI, 2006), quanto à modelagem de células solares. De forma geral, a equação característica do modelo da célula fotovoltaica é obtida mediante a aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff para o circuito equivalente da Figura 4 (EL-AAL, 2005), (ALTAS, SHARAF, 2007), expressa em (2), onde I_{cel} e V_{cel} correspondem a corrente e a tensão do modelo da célula respectivamente.

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2)$$

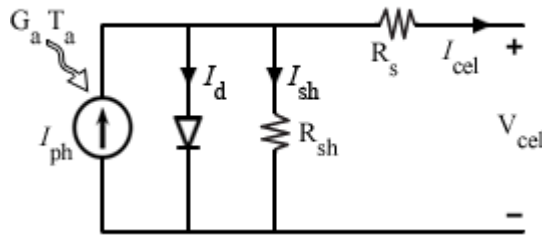


Figura 4 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica (modelo real).

A fotocorrente I_{ph} [A] depende diretamente da irradiação solar, G_a [W/m^2], e da temperatura ambiente T_a [K], expressa por (3). A equação (4) expressa a proporcionalidade de I_{ph} com G_a .

$$I_{ph} = I_0 (1 + K_I (T_c - T_r)), \quad (3)$$

onde

$$I_0 = \frac{G_a I_{sc}}{G_0}. \quad (4)$$

O valor de G_0 é $1000 W/m^2$ e corresponde à referência da irradiação solar. T_r é a referência da temperatura ambiente e K_I corresponde ao coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito, fornecido no catálogo dos fabricantes.

A curva característica V-I de uma célula PV também é influenciada pela temperatura da célula. O balanço de potência determina a temperatura da célula em regime permanente: a entrada é a energia luminosa absorvida, que é parcialmente convertida em saída elétrica útil e o resto é dissipado nas regiões vizinhas. A convecção é o principal mecanismo de dissipação do calor terrestre e radiação é o segundo mecanismo de dissipação de calor que não pode ser desprezado. Uma simplificação comum que se costuma fazer, é considerar que a queda de temperatura da célula aumenta linearmente com a irradiação. O coeficiente depende do módulo instalado, da velocidade do vento, da umidade do ambiente e assim por diante (LUQUE, HEGEDUS, 2003).

Para diferentes valores de irradiação G_a , a temperatura da célula T_c [K] é obtida por (LUQUE, HEGEDUS, 2003):

$$T_c = T_a + G_a \frac{(NOCT - 20^\circ C)}{800 W / m^2}. \quad (5)$$

Na Equação (5), NOCT é um parâmetro denominado “*Normal Operating Cell Temperature*”, geralmente fornecido pelo fabricante do painel. Seus valores mais comuns variam entre 45 e $49^\circ C$ (BP Solar USA, 2008) (LUQUE, HEGEDUS, 2003). O NOCT é definido como temperatura da célula quando a temperatura ambiente for $20^\circ C$, a irradiação

for de $0,8 \text{ kW.m}^{-2}$ e a velocidade do vento for 1 m.s^{-1} . Ela determina o ponto de interseção da função com o eixo vertical:

A corrente no diodo, I_d [A], é expressa por (YUSOF *et al.*, 2004)

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q}{AkT_c} (V_{cel} + R_s I_{cel}) \right) - 1 \right], \quad (6)$$

e

$$I_{sat} = I_{or} \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right], \quad (7)$$

onde:

T_r	Média da Temperatura de referencia [K]
I_{sat}	Corrente de saturação do diodo [A]
q	Carga do elétron: 1.60×10^{-19} [C]
A	Fator de idealização: 1.525
k	Constante de Boltzmann: 1.38×10^{-23} [J/K]
R_s	Resistência série [Ω]
E_g	Gap Energy: 1.11 [eV]
I_{or}	Corrente de saturação do diodo em T_r [A]

Finalmente, a corrente paralelo I_{sh} [A] é calculado por

$$I_{sh} = \frac{V_{cel} + R_s I_{cel}}{R_{sh}}, \quad (8)$$

onde R_{sh} [Ω] é a resistência em paralelo (ou *shunt*) e V_{cel} é a tensão de saída da célula PV.

Pela Lei das Tensões de Kirchhoff,

$$V_{cel} = V_d - R_s I_{cel}. \quad (9)$$

A resistência série é calculada pela equação (10):

$$R_s = - \frac{dV_{cel}}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_{Voc}}, \quad (10)$$

onde

$$X_{Voc} = I_o \frac{q}{nkT_r} e^{\frac{qV_{oc}}{nkT_r}}. \quad (11)$$

A fotocorrente e a corrente no diodo muitas vezes não podem ser calculadas de forma simples. Portanto, pode-se simplificar o modelo usando um número menor de parâmetros que podem ser facilmente obtidos pelo *data-sheet*, tais como a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a potência máxima (P_{max}). Estes parâmetros, portanto, podem ser usados para representar o modelo PV.

Para exemplificar, considera-se que quando: $I_{cel} = 0$, $V_{cel} = V_{oc}$.

No ponto de potência máxima: $V_{cel}(I_{pmax}) = P_{max}/I_{pmax}$. Segundo (EL-AAL, 2005), neste ponto tem-se que,

$$\frac{P_{max}}{I_{pmax}} = V_{oc} \left[1 + \frac{1}{20,7} \ln \left(\frac{I_{sc} - I_{pmax}}{I_{sc}} \right) \right] - R_s I_{pmax}. \quad (12)$$

A partir de (12) pode-se calcular o R_s e finalmente expressar a tensão da célula PV como:

$$V_{cel} = V_{oc} \left[1 + \frac{1}{20,7} \ln \frac{I_{sc} - I_{cel}}{I_{sc}} \right] - R_s I_{cel}. \quad (13)$$

Nota-se que a Equação (1) representa o modelo da célula solar como uma fonte de corrente e a Equação (13) representa a célula solar como fonte de tensão.

2.4 Módulos solares

Cada célula solar produz de 0,4 a 0,7 Volts, de acordo com as suas características construtivas, quando exposto à luz. Então, um módulo PV, ou um painel PV, é constituído por uma matriz de células fotovoltaicas dispostas em conexões série e paralelo. Ao se conectar as células em paralelo, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Devido às características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais. Então, a ligação série é usada na fabricação de quase a totalidade dos módulos comerciais.

As células solares individuais são interconectadas e encapsuladas em uma folha protetora de vidro. Combinado com uma armação de metal e equipado com conectores, os módulos solares podem ser transportados e ser conectados no campo de uma maneira segura e prática (Figura 5). A associação de numerosas células em um módulo gera níveis de tensão, corrente e potência adequada para aplicações práticas e protege as células contra as agressões dos agentes das intempéries, além de isolá-las eletricamente do exterior dando rigidez mecânica ao conjunto.



Figura 5: Módulos ou painéis fotovoltaicos.

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente, que por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo.

Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho, no caso de estar encoberta ou danificada, usa-se um diodo de proteção chamado diodo de passo ou de *bypass* (*bypass diode*) eletricamente conectado à célula, mas com polaridade oposta. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa ou encoberta (LORENZO *et al.*, 1994).

Geralmente o uso do diodo de *bypass* é feito em grupamentos de células, o que torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

A Figura 6 mostra as possíveis ligações de diodos de *bypass* em um módulo fotovoltaico. Devido ao seu princípio de funcionamento, do ponto de vista da Física, a célula solar é basicamente uma grande área de diodo *p-n* com a junção posicionada perto do topo da superfície.

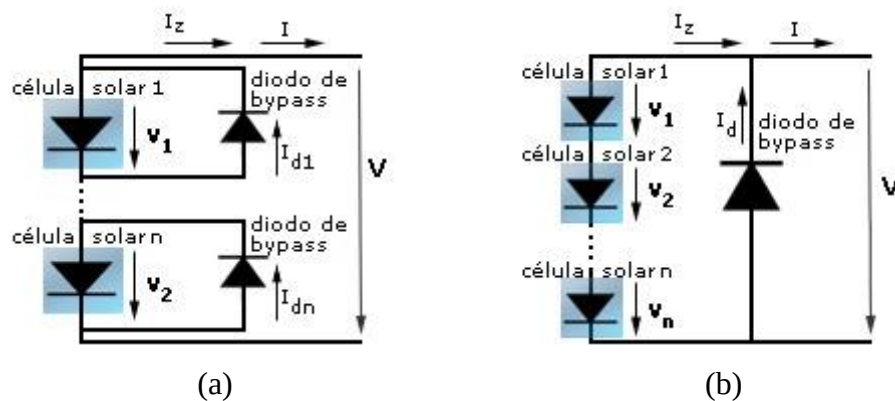


Figura 6: Diodo de *bypass*: (a) por célula; (b) por conjunto de células.

O diodo de *bypass*, é uma característica construtiva dos painéis solares, e por isto existe no mercado módulos com e sem este diodo.

Outro problema que pode acontecer é quando surge uma corrente negativa fluindo pelas células, ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se, o chamado “diodo de bloqueio”, apresentado na Figura 7, impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria.

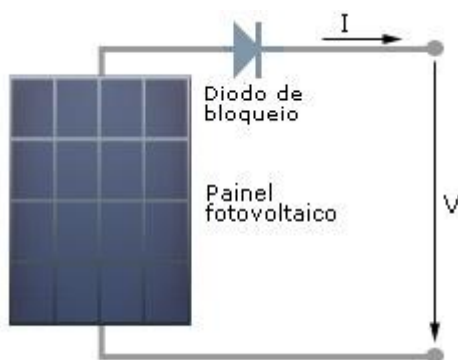


Figura 7: Diodo de bloqueio.

2.5 Modelo de um Arranjo fotovoltaico

Múltiplos módulos podem ser conectados para formar o chamado arranjo (*array*) fotovoltaico (Figura 8). 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.

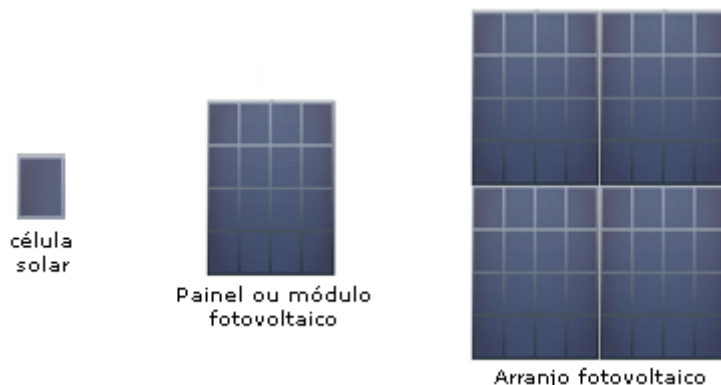


Figura 8: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.

A forma da curva I-V do conjunto de painéis, ou arranjo, que compõe o sistema PV, também deverá ser semelhante ao de uma única célula, obedecendo ao mesmo critério, dado que,

$$I_{\text{arranjo}} = I_{\text{cel}} M_p N_p, \quad (14)$$

$$V_{\text{arranjo}} = V_{\text{cel}} M_s N_s, \quad (15)$$

onde

M_p	Número de painéis em paralelo;
M_s	Número de painéis em série;
N_p	Número de células em paralelo;
N_s	Número de células em série.

Uma vez que todas as células sejam idênticas, a curva I-V do módulo poderá ser determinada pela definição da curva I-V de cada célula, ou seja, 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 I-V da célula e do módulo têm uma forma semelhante, o mesmo modelo é adequado para ambos. Isto é aplicado à formação de um arranjo de painéis.

A partir da modelagem, torna-se possível realizar as análises desejadas através de simulação por computador. A Figura 9 mostra o modelo de um arranjo de painéis solares, implementado no software *MATLAB/Simulink*, criado a partir das equações do circuito elétrico equivalente de uma célula, de (2) a (13), e de (14) e (15). Observa-se que a célula foi tratada como fonte de corrente, Equação (2). Neste caso é necessário fazer-se uso de um bloco de fonte de corrente a fim de se conectar o modelo do arranjo com os componentes elétricos discretos (resistores, capacitores, chaves semicondutoras, etc) da biblioteca *SimPowerSystems* do *Simulink*. A tensão PV (V_{pv} elétrico na Figura 9) medida nesta fonte de corrente é transmitida para o modelo da célula, de forma a completar a equação e garantir um comportamento dinâmico do arranjo (ALTAS, SHARAF, 2007). Assim, para o mesmo valor de potência, se a tensão PV aumentar a corrente diminui e vice-versa respeitando a curva característica PV. Os detalhes internos do circuito equivalente da célula solar (área hachurada da Figura 9) pode ser consultado no Apêndice A.

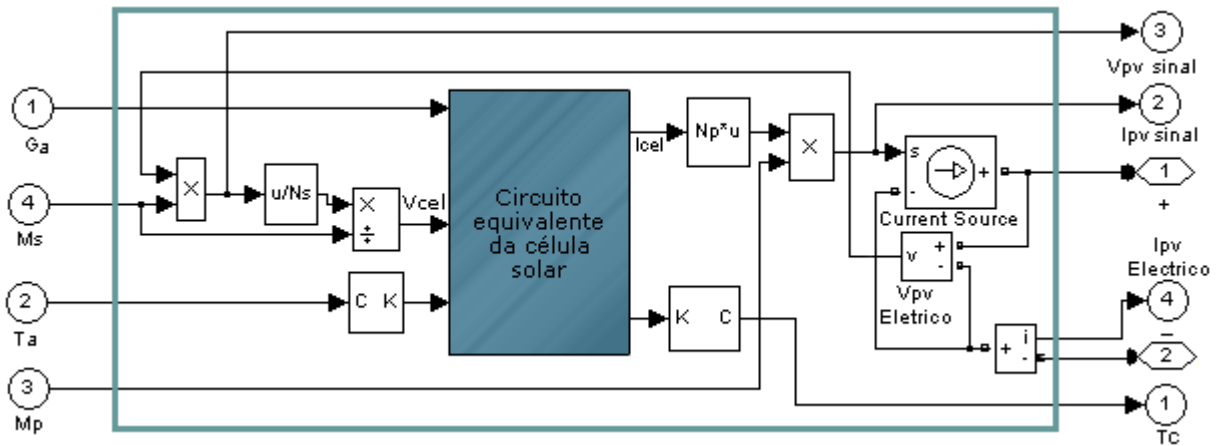


Figura 9: Modelo *Simulink* de um arranjo fotovoltaicos ($V_{pv} = V_{arranjo}$; $I_{pv} = I_{arranjo}$).

2.6 Curvas características simuladas de um módulo solar

Como as condições operacionais são muito variáveis no mundo real, os fabricantes de painéis solares precisam propor algumas condições de teste padrão (*Standart Test Conditions – STC*) de forma que a classificação de um painel possa ser realizada. Qualquer outro painel tem que 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, a 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) (BP Solar USA, 2008). Vale ressaltar que estas condições de operação são raramente encontradas simultaneamente no mundo real. Neste caso escolheu-se o modelo BP Solar SX3200 multicristalino de alta eficiência BPX200 de 200W, [Anexo 1] do fabricante BP, cujas características elétricas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características elétricas do módulo BP Solar SX3200.

Características elétricas	BP Solar SX3200
Potência máxima ($P_{\max}$)	200W
Tensão na Pmax ($V_{p\max}$)	24.5V
Corrente na Pmax ($I_{p\max}$)	8.16A
Pmax mínimo garantido	182.0W
Corrente de curto circuito (I_{sc})	8.7A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	30.8V
Coeficiente de temperatura de I_{sc}	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura de V_{oc}	$-(111 \pm 10)\text{mV} / ^\circ\text{C}$
NOCT (T 20°C ; Sol 0.8kW/m^2 ; vento 1m/s)	$47 \pm 2^\circ\text{C}$
Número de células em série (Ns)	50

O modelo fotovoltaico implementado no Simulink deverá apresentar um comportamento próximo de um painel comercial, ou seja, fornecer a mesma curva característica apresentada no catálogo do fabricante desejado. A Figura 10 apresenta a curva característica do módulo simulado, conforme o modelo da Figura 9, com M_p , M_s e N_p unitários. Após eliminar os algarismos não significativos e realizar o ajuste do Fator de Idealização ou de emissividade (A) que indica o quão perto as células estão umas das outras, o modelo reproduz com precisão aceitável as curvas características V-I e de potência do módulo SX3200.

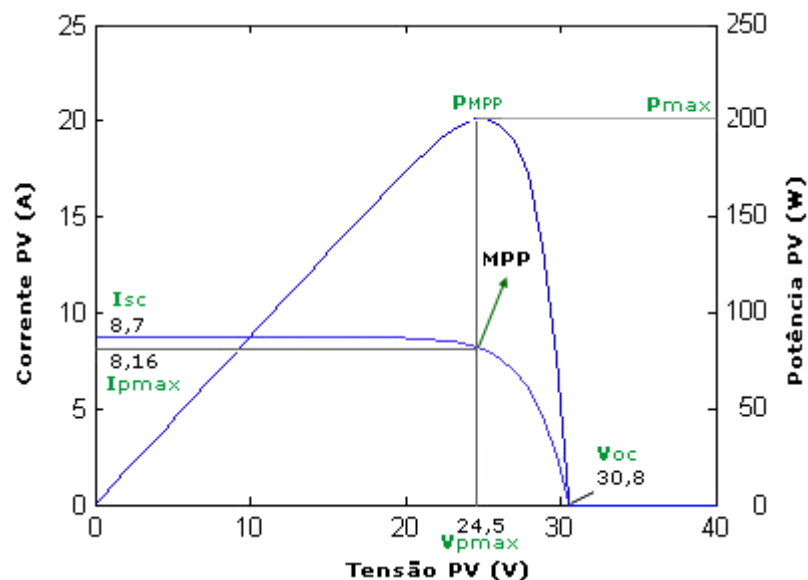


Figura 10: Curva característica simulada para o painel BP Solar SX3200 ($M_p=M_s=N_p=1$, na Figura 9.).

O parâmetro V_{oc} não é fornecido na modelagem matemática, mas deve ser estimado pelo modelo Simulink. Alguns painéis fotovoltaicos de outros fabricantes foram testados para validar o modelo desenvolvido. Um exemplo das curvas características de um módulo PV do fabricante Kyocera encontram-se disponíveis no Apêndice B, onde é demonstrado como são ajustados os parâmetros do modelo a partir dos dados de um *data-sheet* de um fabricante.

2.6.1 Ponto de potência máxima

Painéis fotovoltaicos têm 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. Assim $P_{\max} = I_{p\max} * V_{p\max}$, onde $I_{p\max}$ e $V_{p\max}$ (Figura 10) são tensão e corrente no ponto de potência máxima, respectivamente.

Para se rastrear este ponto deve ser utilizado algum tipo de controle a fim de permitir que um circuito conversor extraia a máxima energia disponível no painel solar. Diferentes estratégias de controle para o rastreamento deste ponto serão apresentadas mais adiante.

2.6.2 Parâmetros de painéis solares

Eficiência de conversão de energia: É a relação entre a máxima potência e a potência da luz irradiada mostrada em (16).

$$\eta_{cel} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{AG_a} \quad (16)$$

Fator de forma: Outro termo de interesse no comportamento global de uma célula solar é o fator de forma (*Fill Factor*). É a relação entre a máxima potência que pode fornecer a uma carga e o produto de I_{sc} e V_{oc} , expressa por

$$F_F = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{V_{oc} I_{sc}}. \quad (17)$$

O fator de forma é diretamente influenciado pelos valores das resistências série (R_s) e paralela (R_{sh}), mostradas na Figura 4. A Figura 10 ilustra o efeito da variação dessas resistências sobre a curva característica V-I. A diminuição de R_s , na Figura 10(a), e o aumento de R_{sh} , na Figura 10(b), resultam num fator de forma mais elevado e, portanto, numa maior eficiência, como indicam o sentido das setas.

O fator de forma típico para as células PV varia entre 0.7 a 0.8 (LORENZO *et al.*, 1994), mas isso pode ser atenuado com o incremento da temperatura.

Fazendo uso da definição de fator de forma pode-se escrever a potência máxima fornecida pela célula como $P_{\max} = F_F I_{sc} V_{oc}$.

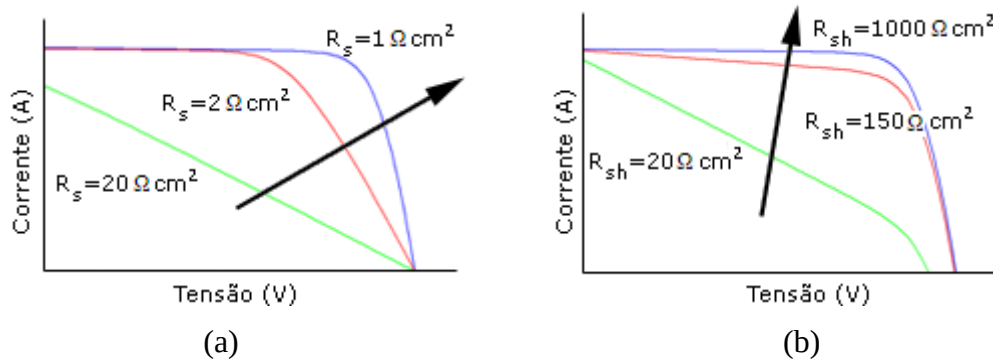


Figura 11: Efeito do (a) incremento de R_s e (b) decréscimo de R_{sh} .

Observa-se na Figura 11 que a variação das resistências altera a área do retângulo de máxima potência, que é dado pelo produto $I_{sc} \times V_{oc}$.

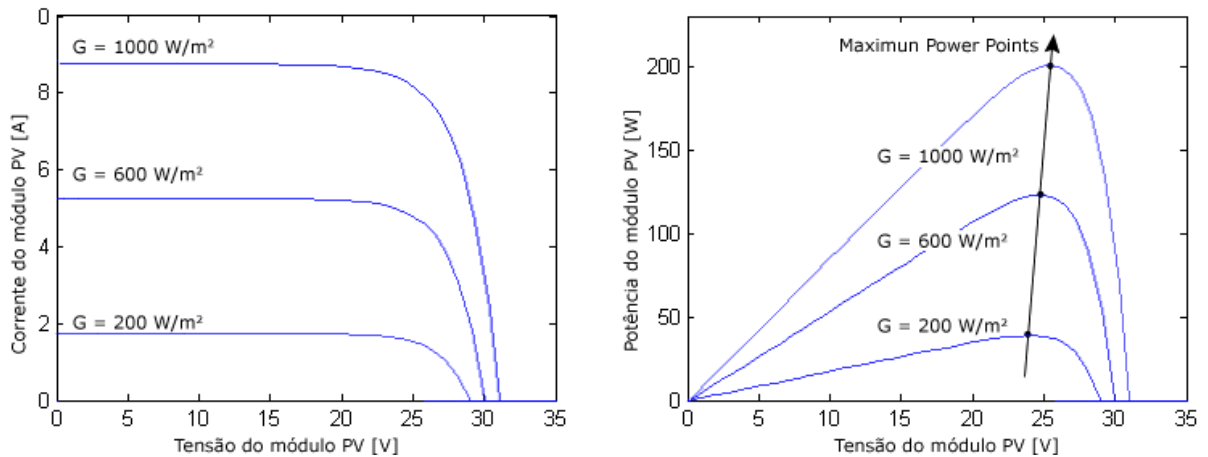
2.6.3 Fatores que influenciam no desempenho

As características de operação de um dado módulo solar dependem da tecnologia de fabricação das suas células, conforme mencionado na Seção 2.2. Porém, as condições ambientais influenciam no desempenho de qualquer módulo solar. O nível de irradiação e a temperatura são os fatores principais que determinam a operação de um sistema elétrico solar numa dada localização geográfica (BP Solar USA, 2008) (REIS, 2002).

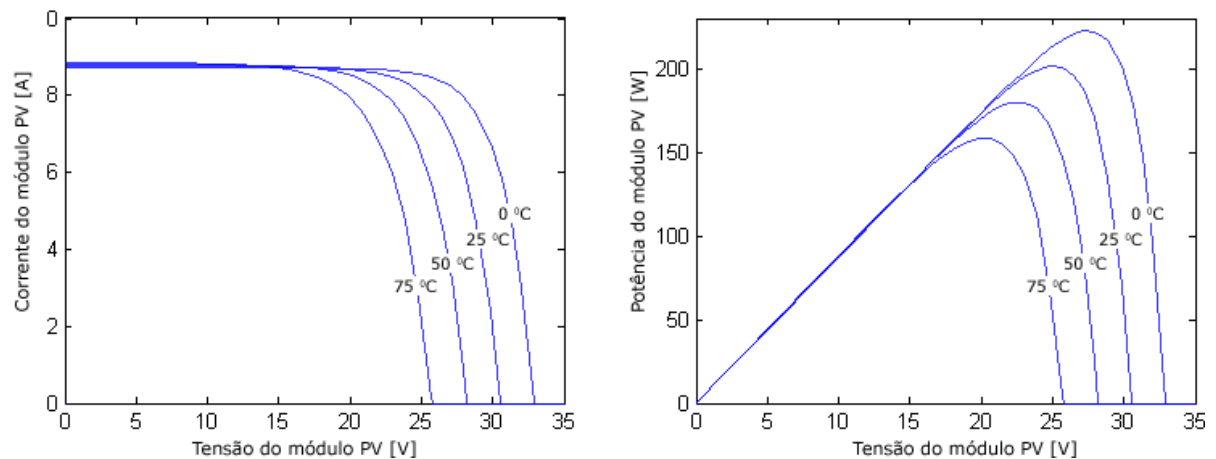
Como a maioria dos dispositivos eletrônicos semicondutores, as células solares operam com maior eficiência a temperaturas mais baixas. O aumento da temperatura em geral é o fator mais importante para a perda de desempenho de uma célula solar (LUQUE, HEGEDUS, 2003). Porém, os painéis solares geram menos energia no inverno do que no verão, em geral devido a dias mais curtos em determinadas localidades, ao baixo ângulo de incidência da irradiação solar, ou a grande cobertura de nuvens.

A potência de saída dos módulos solares 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 fotovoltaicos são fixos em uma determinada estrutura.

A corrente de operação é diretamente proporcional à irradiação incidente sobre sua superfície. A Figura 12 apresenta os resultados simulados sobre a influência da irradiação e da temperatura nas curvas características do módulo comercial BPX3200, usado neste trabalho.



(a) Influência da irradiação solar ($T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).



(b) Influência da Temperatura da célula ($G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$).

Figura 12: Influência da irradiação e da temperatura ambiente nas curvas características do módulo BPX3200.

Observa-se que a corrente do módulo é o parâmetro mais afetado pela variação da irradiação solar, o que vem a ser resultado do fato de serem os fótons que liberam os elétrons, que contribuem para o efeito fotovoltaico na estrutura semicondutora; enquanto que a temperatura exerce maior influência sobre a tensão, conforme indicam os deslocamentos na horizontal das curvas na Figura 12(b), (YI-HWA LIU, RONG-CENG LEOU, JENG-SHIUNG CHENG, 2005).

Capítulo 3

CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A CONFIGURAÇÃO mais simples de um sistema fotovoltaico é composta por um painel, ou arranjo, fotovoltaico diretamente conectado à uma carga CC (YI-HWA LIU, RONG-CENG LEOU, JENG-SHIUNG CHENG, 2005). Este tipo de configuração pode ser adequada à localidades remotas e de clima quente, com as restrições de que a irradiação solar média deve ser conhecida, e a característica de operação da carga deve ser casada com a curva característica do arranjo de painéis no seu ponto de operação de máxima potência (KOLHE; JOSHI; KOTHARI, 2004).

Neste trabalho apenas serão consideradas as configurações que utilizam conversores de eletrônica de potência como etapas de processamento da energia, proveniente dos arranjos de painéis solares, o que inclui a realização do rastreamento do ponto de máxima potência.

3.1 Topologia de conversores fotovoltaicos

Segundo (CARRASCO *et al.*, 2006) não existe uma norma para se classificar as topologias de conversores fotovoltaicos. No entanto, cada configuração de sistema PV está associada a uma determinada topologia de conversor PV que pode incluir um ou mais conversores eletrônicos. A classificação de topologias de conversores PV pode ser feita em relação ao número de etapas de processamento de potência. Essas etapas podem incluir conversão CC-CC, CC-CA e o uso de transformadores. Os principais componentes que são considerados na classificação da configuração PV são os conversores eletrônicos de potência (MEINHARDT; CRAMER, 2000) (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005) (BLAABJERG; ZHE; KJAER, 2004). Assim, com base na classificação desses conversores, destacam-se três tipos principais de configuração de sistema PV: configuração centralizada,

string, *multi-string*, e tecnologia de módulo CA integrado (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005). A seguir serão apresentadas as principais características de cada uma delas.

3.1.1 Configuração centralizada

Nos grandes centros urbanos, as matrizes energéticas inicialmente passaram a incorporar sistemas solares fotovoltaicos do tipo centralizado (MEINHARDT; CRAMER, 2000), cuja característica principal é o uso de um único conversor CC-CA, que deve acoplar o arranjo de painéis à rede trifásica. O arranjo de painéis deve ser composto por um grande número de módulos PV divididos em várias conexões série (denominada *string*), de modo a se obter uma tensão elevada. Estas conexões em série são, por sua vez, ligadas em paralelo, através de diodos *string* a fim de alcançar elevados níveis de potência (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005). A Figura 13 ilustra a configuração centralizada de sistema PV, também conhecida como configuração orientada à planta (ou ao arranjo de painéis), que foi muito usada no passado (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005).

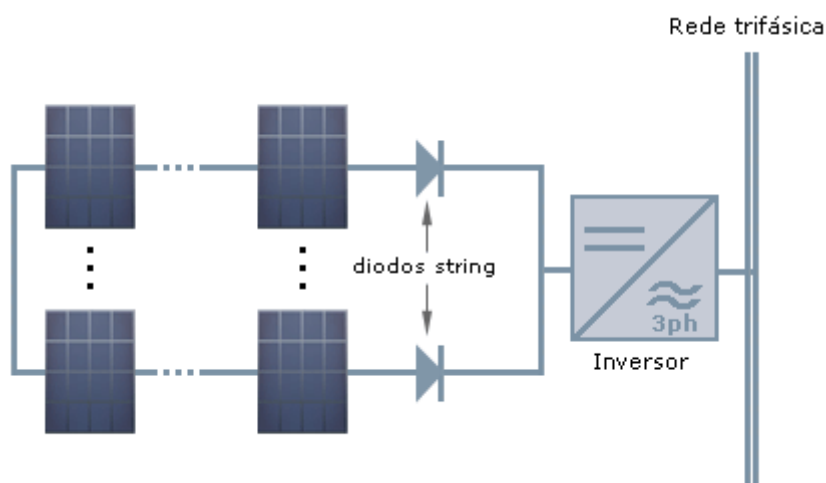


Figura 13: Configuração centralizada de sistema PV.

Segundo (CARRASCO *et al.*, 2006), um dos inconvenientes desta configuração é a necessidade de se dimensionar a potência de pico do inversor no dobro do valor da potência nominal. Outros inconvenientes são: o uso de cabos de alta tensão, uma vez que a potência nominal pode ser de vários megawatts; perdas devido às diferenças de características construtivas dos módulos PV (*mismatch*); e perdas nos diodos *string*. Além disso, o único conversor do sistema deve realizar diferentes funções de controle tais como o controle da

corrente injetada na rede, do nível da tensão e o controle do MPPT. Com um controle de MPPT centralizado, a capacidade de geração da matriz não é totalmente utilizada em situações em que um grupo de painéis está sombreado, danificado ou um pouco desgastado devido ao tempo de utilização. Neste caso, e estando os painéis conectados em série, todos eles serão forçados a conduzir a mesma corrente a partir do painel sombreado, ou danificado, o que compromete o ponto de máxima potência. Também, deve ser considerado que, em caso de falha do inversor ou de outra necessidade de manutenção, o fornecimento de energia à carga deve ser completamente interrompido (IMHOFF; PINHEIRO; HEY, 2007).

Todos esses aspectos tornam esta configuração pouco flexível e contribuem para a diminuição da eficiência e o aumento de custos da energia gerada, o que dificulta a sua produção em massa.

Devido ao fato de que a conversão da energia é feita por um único conversor, a confiabilidade desses sistemas também é reduzido quando comparado a outros sistemas que utilizam uma configuração descentralizada.

No passado, a conexão de um sistema PV centralizado à rede de potência era usualmente concebida por meio de tiristores, o que ocasionava alto conteúdo de componentes harmônicas de corrente e baixa qualidade de energia (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005). A grande quantidade de harmônicos era a oportunidade de desenvolvimento de novas topologias de inversores e de novos tipos de configuração de sistemas PV, a fim de atender aos padrões emergentes de qualidade de energia.

3.1.2 Configuração *string*

A configuração *string* é composta por uma cascata de vários conversores CC-CA, onde cada um desses conversores é dedicado a um grupo de painéis. Por isto é dito que este conversor é do tipo orientado ao módulo e o conjunto deles é chamado de conversor *string* (MEINHARDT; CRAMER, 2000). A Figura 14 ilustra este tipo de configuração. Nota-se que é uma configuração descentralizada, pois cada inversor pode operar de forma independente. Este aspecto traz vantagens em relação à configuração centralizada, dado que não há perdas associadas aos diodos de *string* e os controles de MPPT podem ser aplicados separadamente em cada *string* de painéis. Isso aumenta a eficiência global em comparação com o inversor centralizado (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005).

Através do emprego de uma estratégia de controle adequada é possível permitir que o sistema se mantenha em funcionamento quando houver falha de algum conversor. Neste caso, a potência entregue à carga será reduzida, para que a carga de maior prioridade continue a receber energia, até que se realize a substituição do conversor defeituoso.

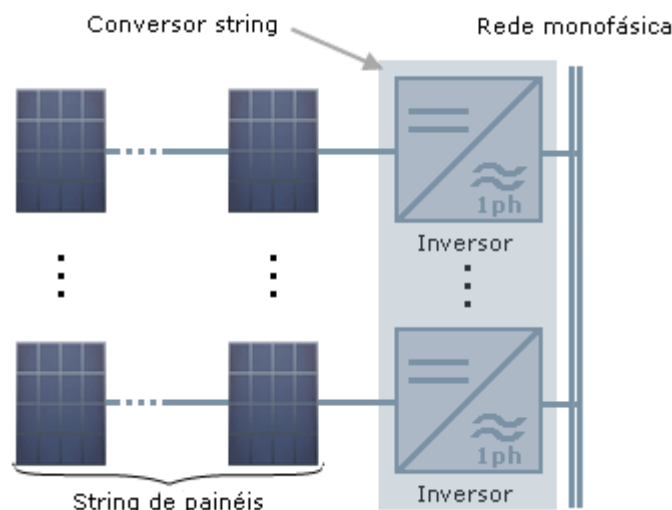


Figura 14: Configuração String, com conversor orientado ao módulo.

O uso de vários conversores orientados ao módulo dá uma característica modular ao sistema, o que permite futuras expansões na potência instalada. Este aspecto é benéfico, em comparação com o sistema centralizado, uma vez que cada string de painéis pode ser controlada individualmente. Assim, um sistema solar string pode ser iniciado com apenas alguns módulos PV.

3.1.2.1 Conceito de Equipe

Este conceito combina a configuração *string* com o conceito mestre-escravo (*master-slave*). A Figura 15 mostra uma conexão de vários inversores na configuração *string* funcionando no conceito de equipe. Esta configuração apresenta um incremento de rendimento energético de cerca de 4% em relação à configuração string convencional (MYRZIK, CALAIS, 2003).

Os conversores eletrônicos são dimensionados para operar numa determinada faixa de potência. Quando a irradiação solar é muito baixa, a potência dos painéis solares é proporcionalmente reduzida e, então, pode ocorrer da potência do inversor situar-se num nível muito inferior ao seu valor nominal, o que prejudica o seu desempenho. Neste caso, alguns ou

todos os arranjos fotovoltaicos podem ser conectados a um único inversor, enquanto que os demais são desligados do sistema, permitindo que um único inversor funcione num nível de potência mais adequado. Com o aumento da irradiação solar os arranjos PV retornam à operação em *string* normal. Nesta configuração cada *string* de painéis opera independente com seu próprio controlador MPPT.

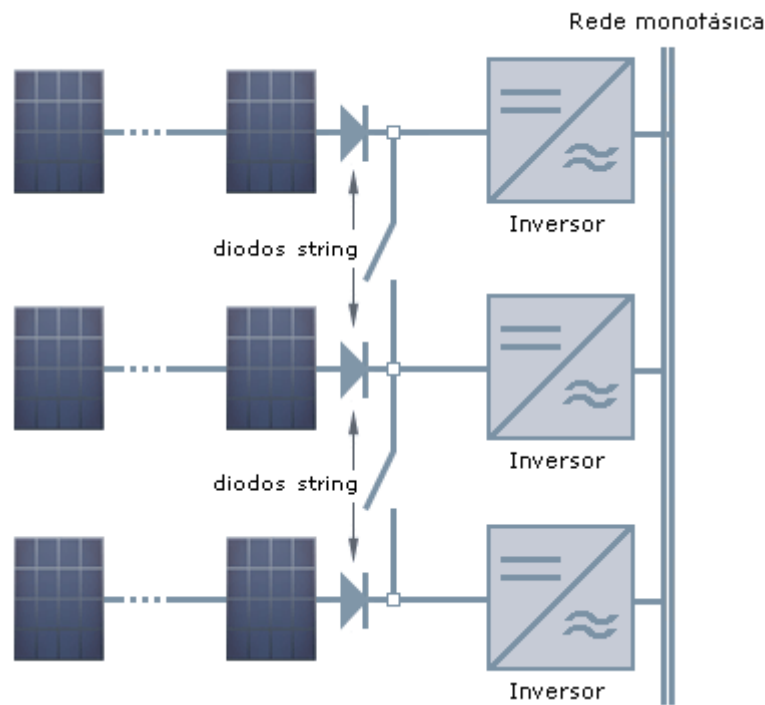


Figura 15: Conceito de equipe

O controle de funcionamento dos inversores em baixa irradiação solar é uma condição conhecida como modo mestre-escravo.

3.1.3 Configuração *multi-string*

Para se construir sistemas fotovoltaicos de custo reduzido é necessário aumentar a capacidade de potência dos conversores PV. Devido à limitada capacidade de tensão dos módulos PV, não é recomendável alargar a potência nominal de um único sistema string apenas conectando mais módulos PV neste sistema (MEINHARDT; CRAMER, 2000).

A tecnologia *multi-string* foi desenvolvida para combinar a vantagem de maior rendimento energético da configuração *string* com a redução dos custos pelo uso de uma central inversora, conforme é usada na tecnologia centralizada.

A Figura 16 mostra a configuração *multi-string*, onde os conversores CC-CC, que podem ser de menor potência, são ligados a cada *string* de módulos PV. Cada um desses *strings* tem seu próprio controle de MPPT que, em geral, é realizado pelo conversor CC-CC. Assim, um melhor rendimento energético pode ser obtido usando-se conversores PV *multi-string*, especialmente em sistemas que tenham *strings* operando sob diferentes condições como sombreamento, orientação (norte, sul, leste e oeste), tipo de terreno, tecnologia, etc (MYRZIK, CALAIS, 2003) (CARRASCO *et al.*, 2006).

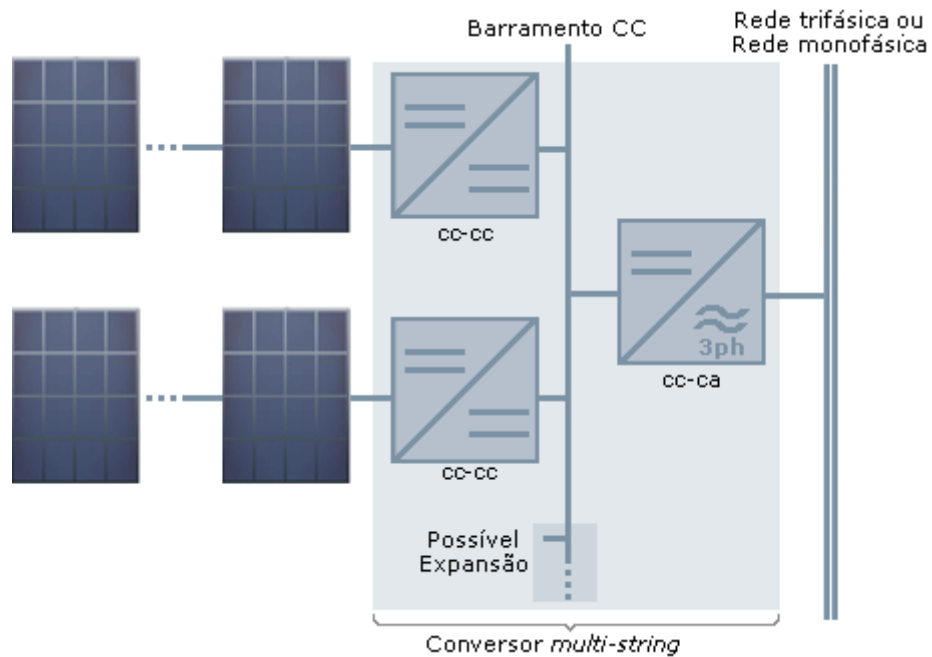


Figura 16: Configuração *multi-string*.

Para expandir a potência do sistema, um string ou arranjo de painéis associado a um conversor CC-CC pode ser inserido no barramento CC que é comum ao inversor. A utilização de vários conversores CC-CC também possibilita a utilização de dispositivos eletrônicos de menor potência, o que pode ser vantajoso em termos de custos. Outra vantagem da utilização de sistemas descentralizados é a possibilidade de empregar controle individual sobre os conversores, com o objetivo de reduzir o *ripple* no barramento CC, que por sua vez leva à utilização de um capacitor de filtro de capacitância e custo reduzidos (IMHOFF, PINHEIRO, HEY, 2007).

A configuração *multi-string*, portanto, compreende as vantagens dos conceitos *string* e centralizada (MEINHARDT, CRAMER, 2000). A Figura 17 apresenta esta simbiose de conceitos.

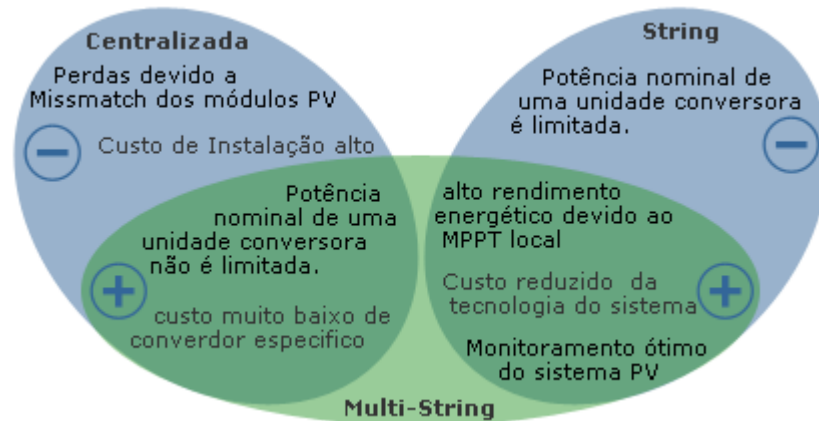


Figura 17: Conceito *multi-string* como associação de sistemas centralizado e *string*.

Nesta topologia é necessário ter um sistema de medições e supervisão e controle mais sofisticado. Devido ao reforço da capacidade da unidade de controle, o conversor *multi-string* pode ser utilizado adicionalmente para compensação ativa de harmônicos e potência reativa, a fim de melhorar a qualidade de potência (MEINHARDT; CRAMER, 2000). Todas as vantagens do conversor *multi-string* contribuem para que esta seja uma configuração atual e futura (KJAER, PEDERSEN, BLAABJERG, 2005) (BLAABJERG; ZHE; KJAER, 2004).

3.2 Futuro dos conversores fotovoltaicos

A tendência para o futuro aponta para o desenvolvimento de sistemas que usam um conversor CC-CA por módulo PV (Figura 18). Para que isso venha a ser uma realidade, serão necessárias novas concepções de conversores. Assim, temas como melhorias no controle do MPPT, redução de distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion – THD%*) e dos níveis de *ripple* de corrente ou de tensão, continuarão a ser aspectos importantes para a pesquisa desses conversores nos próximos anos (CARRASCO *et al.*, 2006). Uma possível desvantagem desta topologia é a complexidade de controle e o aumento do número de dispositivos semicondutores (transistores e diodos).

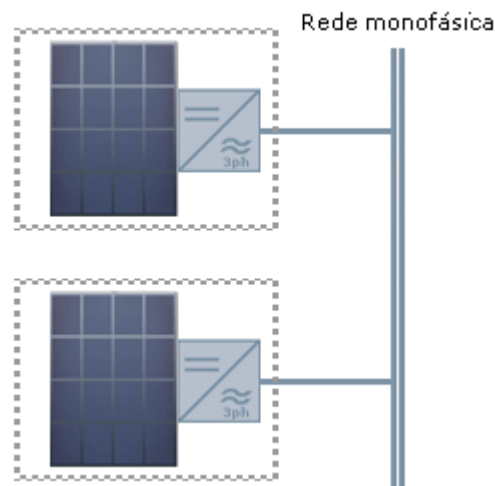


Figura 18: Configuração PV de módulo integrado.

Esta configuração proporciona o surgimento de sistemas do tipo “*plug and play*”, que poderiam ser utilizados por pessoas com pouco ou nenhum conhecimento de instalações elétricas (BLAABJERG; ZHE; KJAER, 2004). Os inversores devem garantir que o módulo PV seja operado no ponto de máxima potência. A operação em torno do MPPT sem demasiada flutuação irá reduzir o *ripple* nos terminais do módulo PV. Também é possível suprimir as perdas por *mismatch* entre os módulos PV uma vez que existe apenas um módulo por conversor. A expansão do sistema é possível devido à sua estrutura modular.

3.3 Configuração do sistema isolado para este estudo

Sistemas fotovoltaicos podem ser agrupados como sistemas autônomos, ou em operação isolada, e sistemas conectados à rede. Os sistemas conectados à rede podem fazer uso de componentes armazenadores de energia, tipicamente um banco de baterias como em (KIM *et al*, 2008) e (YU-KANG LO, TING-PENG LEE, KUAN-HUNG WU, 2008), embora isto não seja uma necessidade para que o sistema seja funcional. Ao contrário dos sistemas fotovoltaicos autônomos, que requerem esses componentes de modo a permitir que a energia gerada possa ser posteriormente utilizada nos períodos de baixa irradiação solar ou à noite. Os sistemas autônomos são alternativas consideradas atraentes e economicamente viáveis de geração de energia elétrica para comunidades em localidades remotas ou isoladas, distantes da rede de distribuição.

Como visto anteriormente, a modularidade dos sistemas descentralizados, nas configurações do tipo *string* e *multi-string*, proporciona uma melhoria na confiabilidade do

sistema, pois a falha de um dos conversores não interromperia o abastecimento energético à carga, bem como permite a expansão da potência do sistema. No entanto, essas configurações têm sido pouco exploradas para a aplicação em sistemas fotovoltaicos autônomos.

A Figura 19 mostra o sistema fotovoltaico considerado neste trabalho. É um sistema PV autônomo e descentralizado, baseado na configuração *multi-string*. São usados dois arranjos fotovoltaicos, em que cada um deles opera com conversor CC-CC independente onde são aplicados os algoritmos de rastreamento do ponto máximo de potência. Esses conversores são ligados em paralelo, formando um barramento CC. Como se pretende fornecer energia de forma interrupta foi usado um banco de baterias também conectado em paralelo no barramento CC. O uso de um único inversor para todo o sistema pode contribuir para a redução dos custos. Entretanto é importante ressaltar que a potência deste inversor deve ser dimensionada para a potência total dos arranjos. O inversor é um dos itens que mais contribui para o custo da geração do sistema PV (YANG CHEN, SMEDLEY, 2004). A conexão de um transformador à saída pode ser necessário para melhor adequação dos níveis de tensão do sistema, e também para atender a quesitos de segurança em termos de isolamento elétrica.

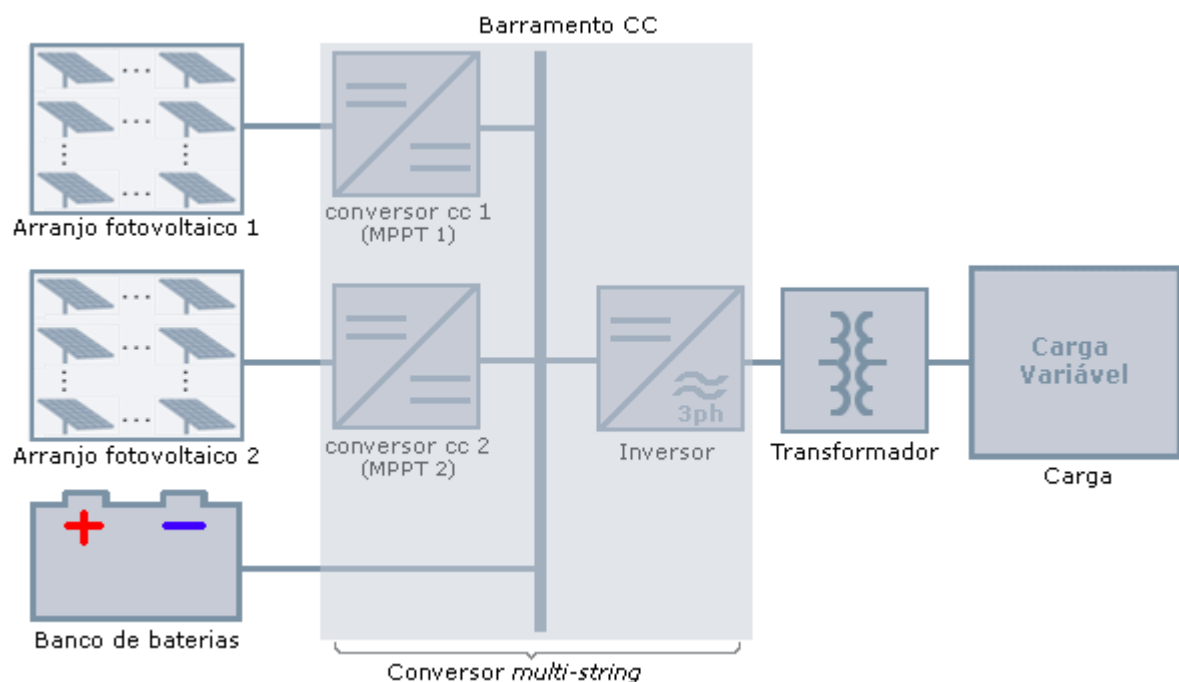


Figura 19: Sistema solar isolado *multi-string*.

Os inversores projetados para funcionar desacoplados da rede de potência devem ser preparados para receber energia em CC tanto dos painéis solares quanto de um sistema de armazenamento de energia (*backup*) (TIRUMALA *et al.*, 2002). Esses inversores geralmente

possuem controladores de carga e descarga para banco de baterias, importantes para elevar a vida útil das mesmas. Além disso, a especificação em tensão desses inversores são geralmente em níveis baixos, compatíveis com as tensões do banco de baterias. Neste trabalho considera-se que o inversor é conectado a um transformador que eleva a tensão para 220 V (valor eficaz), e é conectado a uma carga resistiva trifásica variável.

3.3.1 Uso de conversores CC-CC

Conversores CC-CC são componentes formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte CC de entrada para uma fonte de saída em CC.

No caso de sistemas fotovoltaicos com configuração *multi-string*, esses conversores têm sido principalmente usados para a adequação do nível da tensão e para o rastreamento do ponto de máxima potência dos módulos PV. Para tal, diferentes topologias de conversores CC-CC têm sido propostas na literatura. Os conversores que realizam o MPPT são conhecidos como *MPP Trackers*. As topologias mais comuns são: o conversor elevador de tensão (*Boost*), o conversor abaixador de tensão (*Buck*) e o conversor abaixador elevador de tensão (*Buck-Boost*).

Apesar da maior eficiência intrínseca da topologia *Buck* em sistemas com fontes de energia convencionais, a topologia *Boost* pode ser mais adequada para realizar o MPPT de sistemas fotovoltaicos, dado que o conversor opera em modo contínuo de corrente podendo extrair o máximo possível das células solares. Daí, a eficiência energética do conversor *Boost* pode ser maior do que a do conversor *Buck* (GLASNER, APPELBAUM, 1996). Além disso, os painéis solares fornecem tensões baixas e frequentemente, para a maioria das aplicações, é necessário elevar essas tensões. Por estes motivos, neste trabalho usa-se a topologia *Boost* para se conectar os arranjos fotovoltaicos ao barramento CC e realizar o MPPT.

3.3.1.1 O Conversor *Boost*

O diagrama elétrico do conversor *Boost* é apresentado na Figura 20. Quando a chave *S* (implementado neste trabalho por um MOSFET) conduz, a corrente aumenta armazenando energia na indutância *L*. Quando a chave *S* é aberta, o diodo *D* é diretamente polarizado, e a

energia armazenada na indutância é transferida para a carga (RASHID, 2003), (MOHAN, UNDELAND, ROBBINS, 2002). A tensão de saída V_o será o resultado adicional da energia fornecida pelo arranjo PV e da armazenada pela indutância.

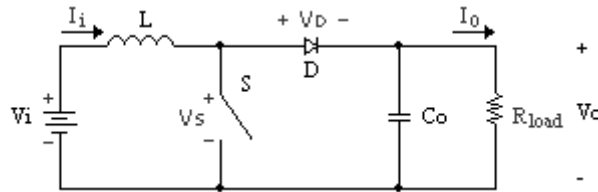


Figura 20: Conversor *Boost*.

O intervalo de chaveamento da chave S é definido por:

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad (18)$$

onde F_s é a frequência de chaveamento.

A razão entre o intervalo de condução da chave S (T_{on}) e o período de chaveamento (T_s) é definida por razão cíclica (*duty cycle*) ou ciclo de trabalho (*duty ratio*), e é dada por:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}. \quad (19)$$

O *duty cycle* varia de 0 a 1. Como a tensão média sobre o indutor deve ser nula para um período de chaveamento T_s , então:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} (V_o - V_i) dt \quad (20)$$

e

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}. \quad (21)$$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é definida por ganho estático, ou em regime permanente, do conversor. Esta relação é mostrada na Figura 21.

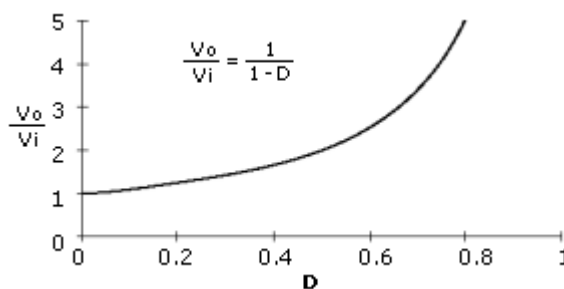


Figura 21: Ganho estático do conversor *Boost*.

Pode-se obter ainda, uma relação entre as correntes de entrada e saída do conversor admitindo-se que não há perdas no sistema e, assim, as potências de entrada, P_i , e de saída, P_o , são iguais ($V_i I_i = V_o I_o$). Desta forma tem-se que:

$$\frac{I_o}{I_i} = 1 - D. \quad (22)$$

Esta relação é de extrema importância para o controle do conversor *Boost* uma vez que neste trabalho o controle do conversor será realizado usando a referência de corrente de entrada do *Boost* (I_i).

As principais formas de onda do conversor *Boost* são mostradas na Figura 22.

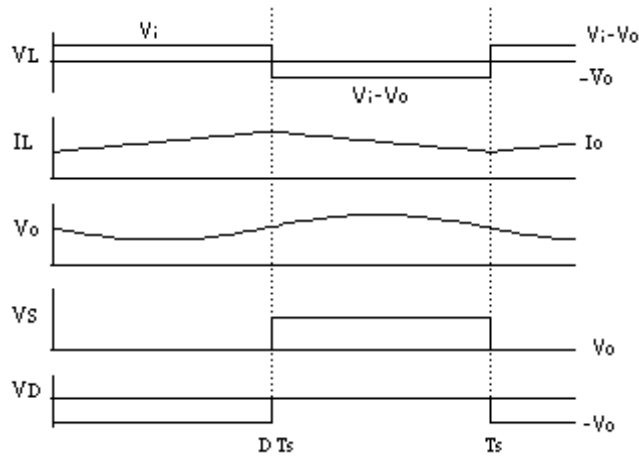


Figura 22: Principais formas de onda do conversor *Boost*.

A ondulação (*ripple*) na corrente de entrada varia conforme

$$\Delta I_i = \frac{D V_i}{F_s L}, \quad (23)$$

e o *ripple* de tensão no capacitor de saída é dado por

$$\Delta V_{C_o} = \frac{I_o D}{F_s C_o}. \quad (24)$$

O capacitor C_o deve ser projetado para um nível de *ripple* estabelecido como aceitável. A Figura 23 mostra os *ripples* de tensão e corrente.

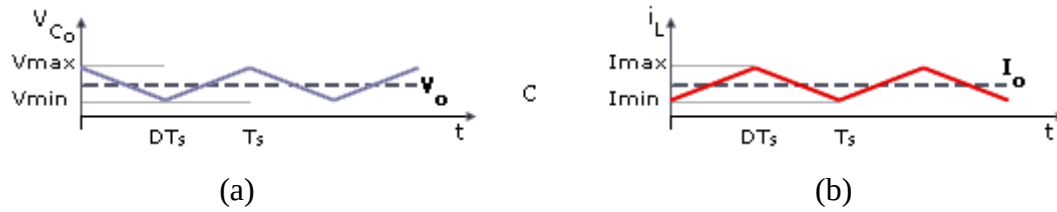


Figura 23: *Ripple*: (a) de Tensão; (b) de Corrente.

Neste trabalho considera-se que os pulsos de comando da chave são gerados com frequência de chaveamento fixa. Utiliza-se a modulação por largura de pulso. Uma forma de gerar os sinais de comando com frequência fixa é através de 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 24 ilustra de forma simplificada o controle PWM.

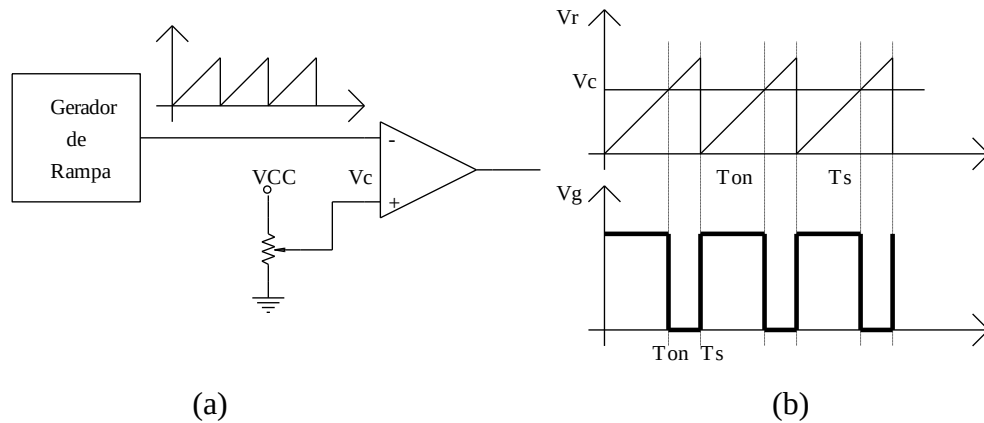


Figura 24: Exemplo de um PWM. (a) Circuito PWM; (b) Pulso PWM.

O princípio de funcionamento do PWM é descrito a seguir. A portadora dente-de-serra é comparada 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. Tem-se assim a modulação por largura de pulso. O fator que determina o *duty cycle* é 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.

Para cálculo de um projeto do conversor *Boost* é necessário dimensionar alguns parâmetros: tensão de entrada (V_i), variação de tensão de saída (ΔV_o), frequência de chaveamento (F_s), potência de saída (P_o), tensão de saída (V_o) (GLASNER, APPELBAUM, 1996), (RASHID, 2003).

Os valores do capacitor e do indutor do *Boost* são dados por

$$C_o = \frac{V_o \frac{1}{F_s} D}{2\Delta V_o R_{load}}, \quad (25)$$

$$L = \frac{2CV_o\Delta V_o}{2I_i\Delta I_i}. \quad (26)$$

E a carga pode ser calculada por

$$R_{load} = \frac{V_i}{I_i(1-D)^2}. \quad (27)$$

Usando as Equações (25) a (27) obtém-se $L = 181.8\mu\text{H}$ e $C_o = 2500\mu\text{F}$, considerando os seguintes parâmetros de projeto: $F_s = 5\text{kHz}$, $P_o = 3\text{kW}$, $V_o = 200\text{V}$. A tensão V_o deve ser dimensionada de acordo com a tensão do banco de baterias.

3.3.2 Banco de baterias

Do ponto de vista operacional, a geração PV apresenta grandes variações nas suas potências de saída devido a condições meteorológicas intermitentes. Esses fenômenos podem causar problemas operacionais no sistema causar excessivos desvios de frequência. Um método para superar este problema é integrar as instalações fotovoltaicas com sistemas de backup a diesel, célula combustível ou banco de baterias (CONTINO *et al.*, 2006) (VALE *et al.*, 2004).

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.

O ambiente de simulação Matlab/Simulink versão 7.7 usado neste trabalho, tem na sua biblioteca um bloco que implementa um modelo genérico que pode ser parametrizado para representar os mais populares tipos de baterias recarregáveis além de poder representar outros tipos de baterias definidas pelo usuário.

A Figura 25 representa o circuito equivalente do modelo genérico da bateria do Simulink que é definido pelas seguintes equações:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + X \exp(-B \cdot it), \quad (28)$$

$$it = \int_0^t i_{batt} dt, \quad (29)$$

$$SOC\% = 100 \left(1 - \frac{Q \cdot 1.05}{\int i dt} \right). \quad (30)$$

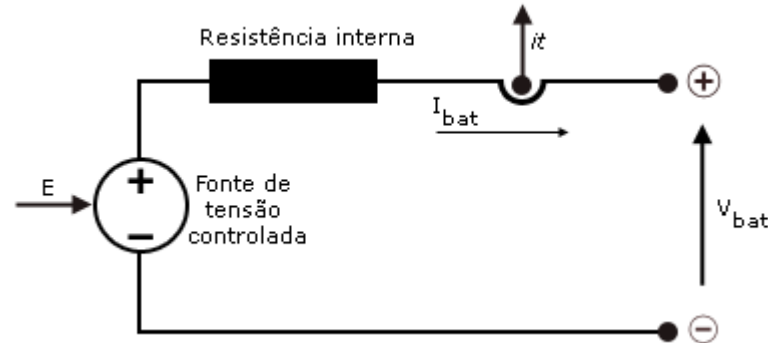


Figura 25: Circuito equivalente do modelo da bateria.

A modelagem é feita com base nas curvas características da bateria onde, E = Tensão a vazio (V); E_0 = Tensão constante (V); K = Tensão de polarização (V); Q = Capacidade da bateria (Ah); X = Tensão exponencial (V); B = Capacidade exponencial (Ah) $^{-1}$; e $SOC\%$ (*State Of Charge*) é o estado da carga da bateria.

Através deste bloco, é possível representar um determinado tipo de bateria, de acordo com os dados do *data-sheet* do fabricante. Existem inúmeros tipos de baterias no mercado, mas a de chumbo ácido é em geral a mais usada em razão de seu baixo custo e facilidade de aquisição. No entanto apresenta inúmeros inconvenientes no que diz respeito à manutenção, dimensão física e ciclo de vida reduzido (SOILEAU, 1994).

O mercado está aceitando novas alternativas viáveis para substituir baterias de chumbo ácido oferecendo mais energia, melhoria do ciclo de vida, menor peso e menor tamanho e manutenção limitada. Uma dessas alternativas é a tecnologia de Fosfato de Lítio, usada neste trabalho.

O modelo da bateria utilizado foi o EPOCH E1-12-40 [Anexo 2] de 12.8 V, 42 Ah e 532Wh, por apresentar inúmeras vantagens. Segundo o *data-sheet* do fabricante suas principais características incluem:

- Interfaces inteligentes de controle eletrônico para acompanhamento do *SOC*, corrente e tensão e temperatura na bateria.
- Excelente curva característica de carga.
- Manutenção zero, considerando seu longo ciclo de vida útil em condições normais de operação, em torno de 2000 ciclos a 100% *DOD* (*depth of discharge*) – inclinação da curva de descarga, definida como quantidade de energia ou carga de que é removida de uma célula

ou bateria completamente carregada, expressa como uma percentagem da capacidade nominal.

- Proporciona o dobro do tempo de resposta, com 35% de redução de peso em comparação com a tecnologia chumbo ácido.
- Sistemas configuráveis para até 48 em série e 16 em paralelo, com até 240 baterias por controlador.
- Cada módulo de bateria tem incorporada uma proteção automática por sobrecarga, descarga excessiva e excesso de temperatura.

Para todas as simulações, o banco de baterias é composto por 15 baterias EPOCH E1-12-40 em série cuja curva característica de carga e descarga está mostrada na Figura 26.

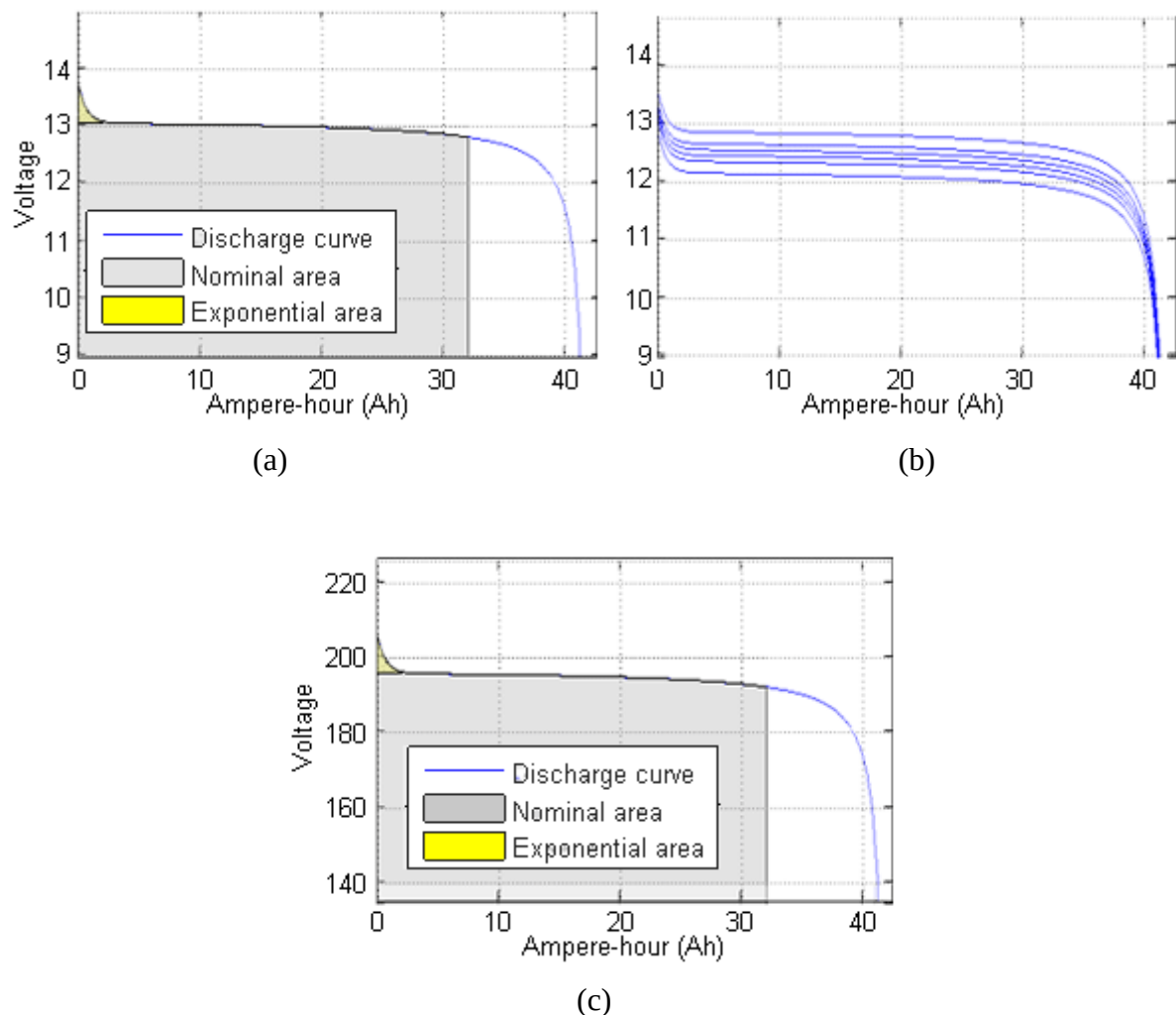


Figura 26: Curva característica de descarga do banco de baterias: (a) Corrente nominal de uma bateria; (b) Correntes de carga e descarga de uma bateria; (c) Corrente nominal do banco de baterias.

Capítulo 4

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

NESTE capítulo serão apresentados os resultados de simulação de um sistema solar fotovoltaico para avaliação de diferentes métodos de rastreamento do ponto de potência máxima. Nas Seções 4.1 a 4.3 considera-se um sistema monofásico isolado, mostrado na Figura 27, alimentado por um arranjo fotovoltaico formado por 5 módulos PBSX3200 de 200W em série e 3 em paralelo, totalizando 3kW de potência. A este arranjo está conectado o conversor *boost*, através do qual será realizado o MPPT, e o banco de baterias, previamente dimensionados. O circuito alimenta uma carga variável composta por duas cargas resistivas de 1,5kW.

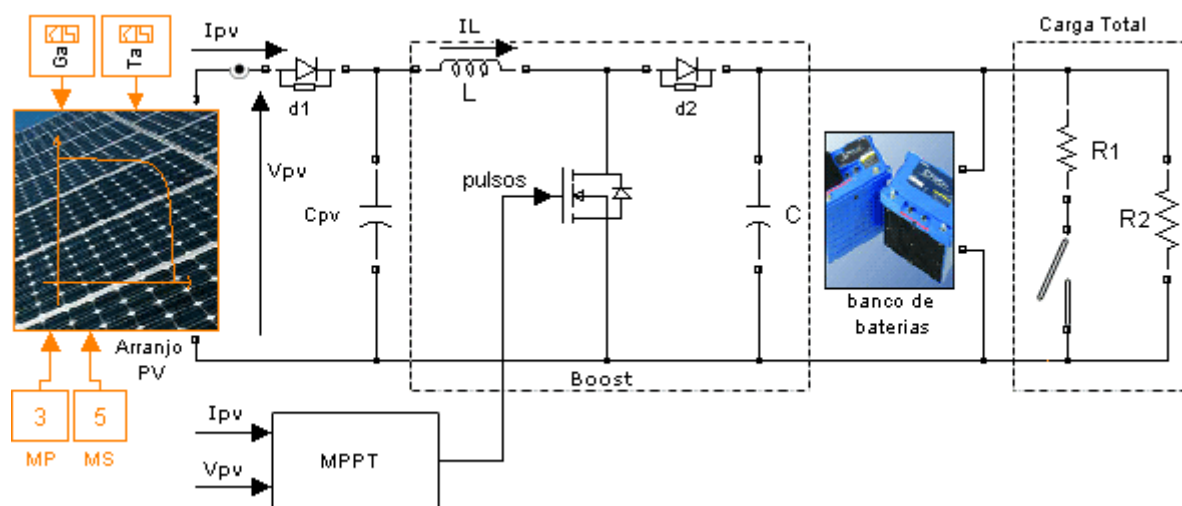


Figura 27: Sistema fotovoltaico isolado.

A Figura 28 apresenta algumas curvas características do arranjo fotovoltaico utilizado. Nela estão mostrados alguns valores teóricos para a sua operação em máxima potência, para diferentes níveis de irradiação solar e temperatura ambiente estimados pelo modelo PV para *Simulink*. O que se pretende é verificar a velocidade de rastreamento, a capacidade que cada

método tem de rastrear e permanecer no ponto máximo teórico, e ainda analisar os níveis de corrente *rms* e potência em VA nos dispositivos de potência.

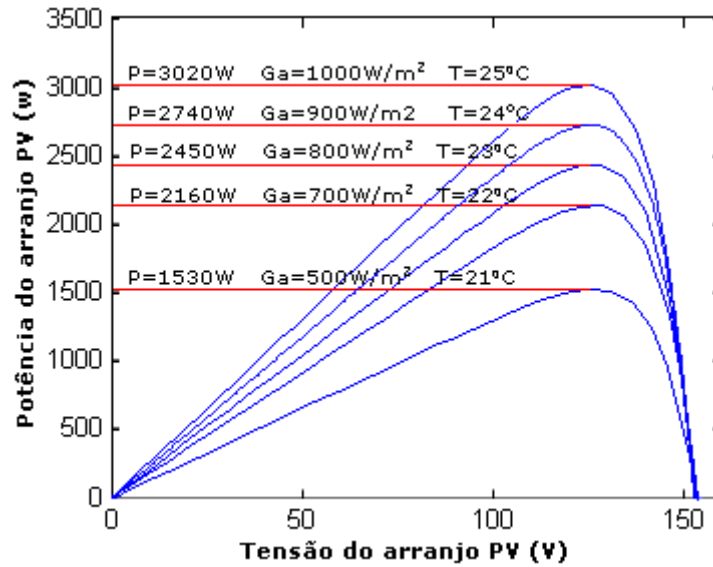


Figura 28: Curvas características V-I do arranjo PV.

4.1 Sistema fotovoltaico em operação sem MPPT

O sistema PV opera sem rastreamento do ponto de máxima potência quando nenhum algoritmo é aplicado para controlar a variação do ciclo de trabalho do conversor CC-CC a ele conectado.

Na Figura 29 é mostrada a variação da irradiação solar e da temperatura ambiente em relação ao tempo. Neste caso T_a varia linearmente com G_a , o que acontece na maioria das vezes, mas não é necessariamente uma regra. Quando há variações nas condições meteorológicas e na carga, o ponto de operação elétrico do painel se desloca do MPP, como ilustra a Figura 30, tendo em vista que o sistema opera com controle em malha aberta e o conversor *Boost* com um *duty cycle* fixo que não acompanha a variação de G_a e T_a . A linha de máxima potência indicada na figura reflete os valores teóricos de potência máxima estimados pelo modelo do arranjo PV na Figura 28.

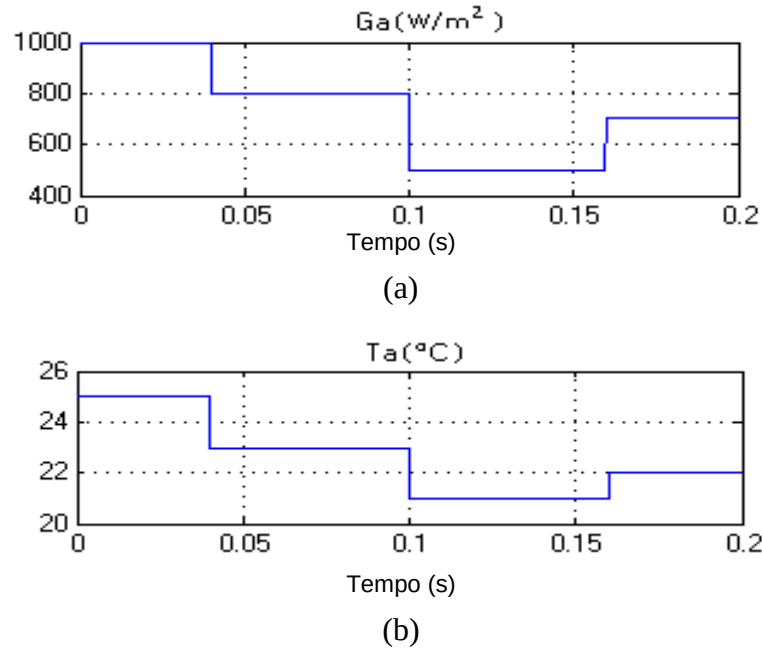


Figura 29: Variação de: (a) G_a - Irradiação solar e (b) T_a - Temperatura ambiente.

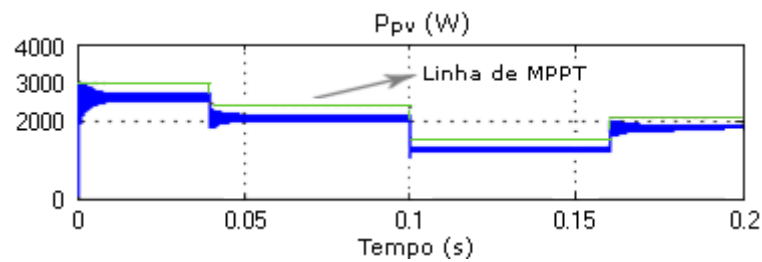


Figura 30: Exemplo do sistema PV em operação sem MPPT.

Observa-se que o painel está operando em um ponto abaixo da linha de máxima potência. Apesar do arranjo PV ser dimensionado para fornecer 3kW de potência a $1000W/m^2$ e $25^{\circ}C$, esta energia não está sendo aproveitada nestas mesmas condições de operação.

4.2 O Método MPPT através da Perturbação e Observação do sistema

O método que rastreia o ponto máximo de potência através da Perturbação e Observação do sistema (*Perturb and Observe – P&O*) tem sido amplamente utilizado devido à sua estrutura simples de controle e necessidade de medição de poucos parâmetros (tensão e corrente do arranjo PV) para realizar o MPPT. O diagrama de blocos do método *P&O* está mostrado na Figura 31, onde I_{pv} e V_{pv} são as medidas de corrente e tensão do painel

fotovoltaico, respectivamente. I_{ref} é uma corrente de referência fornecida pelo algoritmo para operação do arranjo em máxima potência, que deverá ser comparada com a corrente de operação do painel I_{pv} . O resultado desta comparação constitui a entrada de um controlador PI que produz um índice de modulação do PWM que se encontra conectado ao dispositivo comutador do conversor *Boost* que está conectado ao arranjo fotovoltaico.

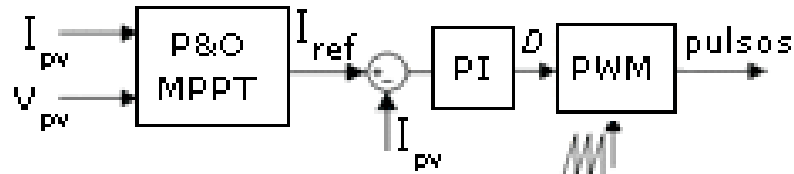


Figura 31: Diagrama de blocos do método *P&O* por I_{pv} .

A Figura 32 mostra o fluxograma do método *P&O* usado neste trabalho, cuja referência para a variável de controle é a corrente do painel fotovoltaico. O controle deverá minimizar a diferença das correntes. Para isso, o algoritmo perturba periodicamente a variável de controle ($I_{ref}(k)$), adicionando-o ou subtraindo-o de um determinado valor fixo ($\Delta I_{ref}(k)$) e compara a potência do arranjo fotovoltaico ($P_{pv}(k)$) instantânea produzida por essa perturbação com a potência imediatamente antes a esta mesma perturbação ($P_{pv}(k-1)$).

O algoritmo funciona da seguinte forma: primeiramente inicializa-se as variáveis $I_{ref}(k)$, ΔI_{ref} e $P_{pv}(k-1)$ e em seguida é medido V_{pv} e I_{pv} para calcular o $P_{pv}(k)$. Se $P_{pv}(k) > P_{pv}(k-1)$, significa que a última perturbação (ΔI_{ref} atual) conduziu ao aumento da potência, a perturbação posterior é feita na mesma direção, ou seja, a saída $I_{ref}(k) = I_{ref}(k) + \Delta I_{ref}(k)$ com $\Delta I_{ref}(k)$ positivo. Caso contrário, se $P_{pv}(k) < P_{pv}(k-1)$ o controle perturba o sistema na direção oposta, ou seja, a saída $I_{ref}(k) = I_{ref}(k) - \Delta I_{ref}(k)$. Observa-se que neste caso $\Delta I_{ref}(k)$ é negativo. Finalmente é atualizado o valor de $P_{pv}(k-1) = P_{pv}(k)$. Desta forma, o MPP é rastreado continuamente.

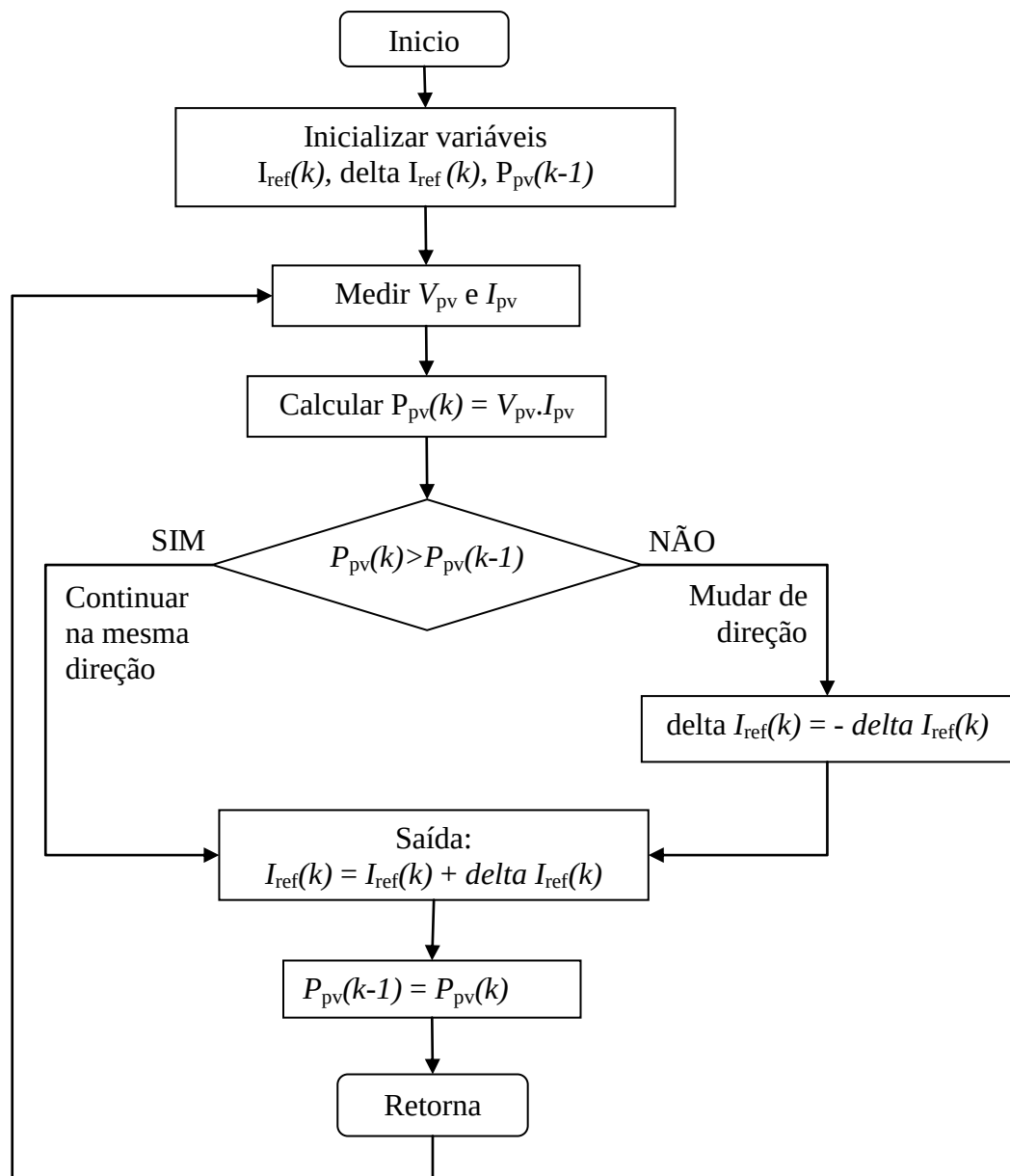


Figura 32 - Fluxograma do algoritmo $P\&O$ com saída $I_{ref} = I_{pvref}$.

A Figura 33 mostra a resposta do painel fotovoltaico mediante a variação da irradiação e da temperatura ambiente.

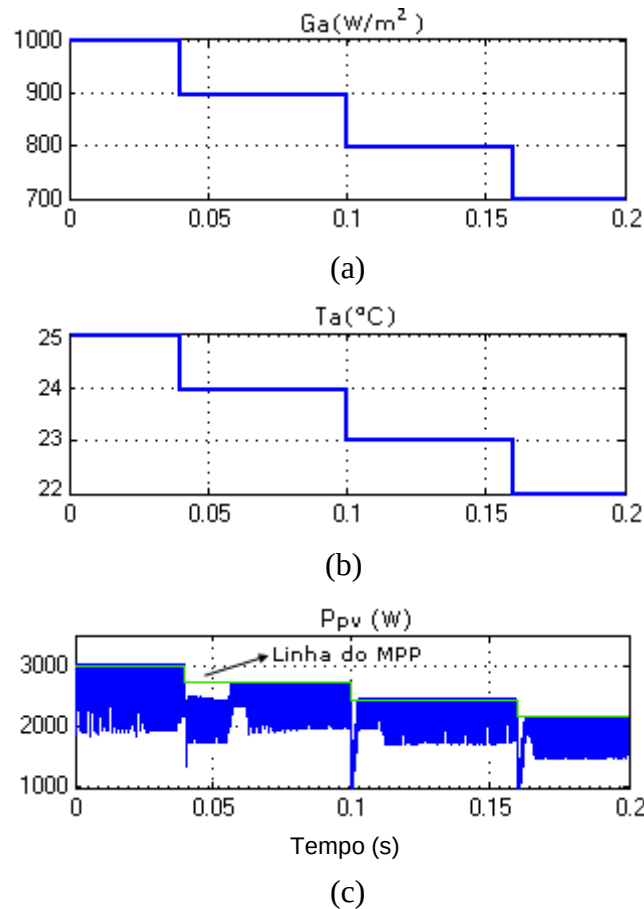


Figura 33: Simulação do método MPPT por P&O com saída I_{pv} . (a) G_a - Irradiação solar; (b) T_a - Temperatura ambiente e (c) P_{pv} – Potência do arranjo fotovoltaico.

O P&O tem a vantagem de não depender das características do módulo PV no processo do MPPT. No entanto, um inconveniente da técnica, mostrado na Figura 33, é que, em estado estacionário, o ponto de funcionamento oscila em torno da MPP devido à constante perturbação dando origem à perda de alguma quantidade de energia disponível. Associado aos ruídos provocados pela frequência de chaveamento adotado para as chaves do conversor *Boost* (5kHz), o resultado foi um sinal de potência máximo bastante ruidoso. O tempo total de simulação é de 0,2 s é um tempo aceitável para o *Toolbox do Matlab Power System Blockset* quando se usa conversores chaveados.

Várias melhorias do algoritmo P&O têm sido propostas, a fim de reduzir o número de oscilações em torno do MPP em estado estacionário (TAN, GREEN, HERNANDEZ-ARAMBURO, 2005). Uma delas é mudar a variável de controle para a corrente de entrada no indutor (I_L), ao invés da corrente do painel (I_{pv}) mostrados na Figura 27. Este método é apresentado em (TAN, GREEN, HERNANDEZ-ARAMBURO, 2005).

O diagrama de blocos da Figura 34 mostra o método MPPT P&O, onde a corrente de referência no ponto de máxima potência é comparada com a corrente do indutor (I_L) da Figura

27. Neste caso, o algoritmo *P&O* é o mesmo usado para o caso MPPT por I_{pv} como variável de controle.

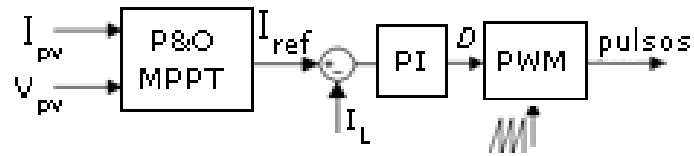


Figura 34: Diagrama de blocos do método *P&O* por I_L .

O comportamento do sistema PV, incluindo banco de baterias e carga, mediante a variação das condições atmosféricas, para este método é mostrado na Figura 35.

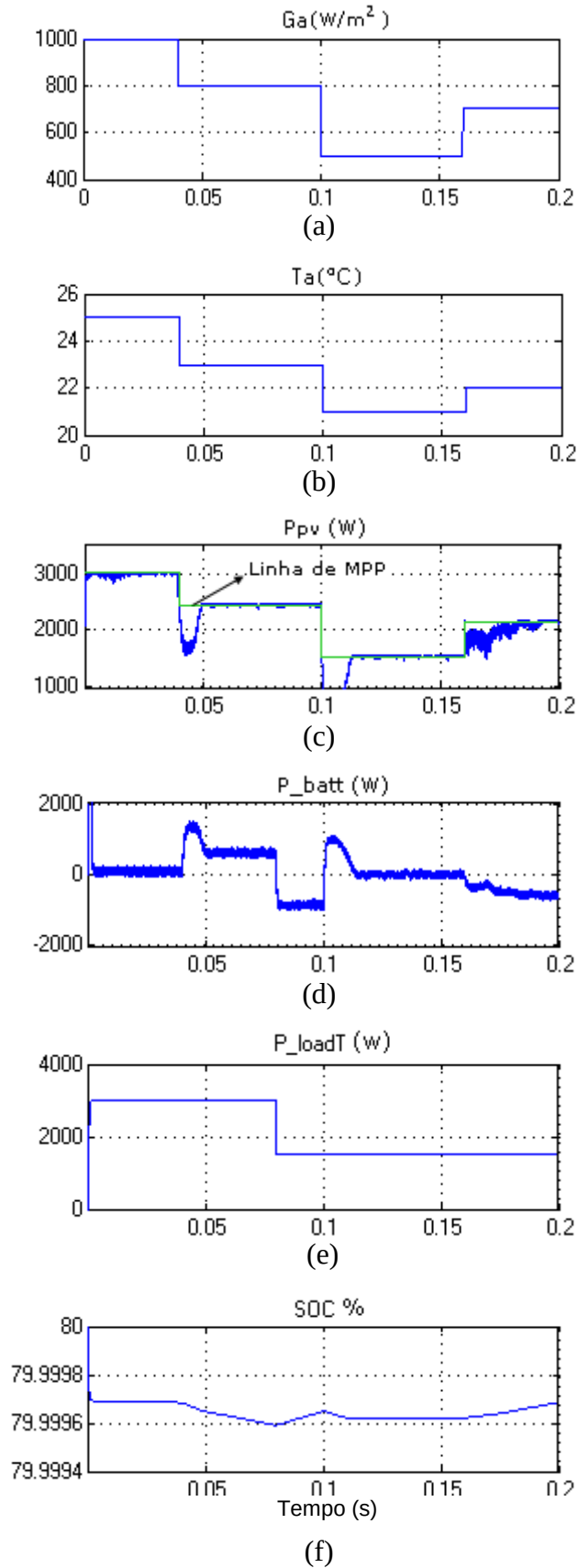


Figura 35: Simulação do método MPPT por P&O através de I_L . (a) G_a - Irradiação solar; (b) T_a - Temperatura ambiente; (c) P_{pv} - Potência do arranjo PV; (d) P_{batt} - Potência do banco de baterias; (e) P_{loadT} - Potência da carga; (f) SOC - Estado de carga da do banco de baterias.

Observa-se que na Figura 35(c) para todas as variações de G_a e T_a a potência do arranjo PV é máxima, com baixo nível de ruído.

Em 0,04 segundos a insolação diminui de 1000W/m^2 para 800W/m^2 (Figura 35(a)), abaixando a capacidade de potência do painel de forma que o banco de baterias fornece a respectiva quantidade de energia para satisfazer a carga (Figura 3(e)). A Figura 35(d) mostra que no instante 0,8 segundos a carga é reduzida de 3kW para $1,5\text{kW}$. Nesse instante o banco de baterias recebe o excedente de energia dado que a potência do painel permaneceu constante. O banco de baterias não atua nos instantes de zero a 0,04 segundos e de 0,12 a 0,16 segundos (Figura 35(e)), onde o estado da carga (SOC) da bateria permanece constante (Figura 35(f)) dado que a potência do painel é igual ao solicitado pela carga. Observa-se que o banco de baterias não está totalmente carregado no início da simulação.

A curva apresenta desvios do MPP quando há variação abrupta de G_a e T_a . Além disso, existe certa lentidão para se atingir o ponto de máxima potência, característica própria do algoritmo *P&O* (FEMIA *et al.*, 2005), devido aos seus parâmetros: o intervalo de tempo entre o momento em que a medição é feita e o momento em que a potência se move para o seu ótimo valor (passo de iteração) e o valor da perturbação (delta I_{ref}). A forma como esses parâmetros influenciam o desempenho do algoritmo está descrito a seguir.

O efeito do valor da perturbação

A Figura 36 mostra o comportamento do sistema em operação com MPPT através do método *P&O*, de acordo com o valor da perturbação. Para um dado intervalo, quanto maior é o valor da perturbação mais rápido a corrente PV pode ser conduzido para o MPP, Figura 36(a). No entanto, quanto maior é o valor desta perturbação, maiores são as oscilações intrínsecas ao redor do MPP em regime. Estas oscilações podem reduzir a eficiência na conversão de potência do painel, devido ao grande erro que gera, além de perda na geração de energia. Um valor menor de perturbação, Figura 36(b), reduz a amplitude de oscilação em torno do MPP e aumenta a eficiência da conversão de energia quando o MPP for atingido. No entanto, isso só resolve o problema em regime, já que conduziria igualmente a uma resposta lenta em caso de rápida alteração de irradiação e temperatura. Um pequeno valor de perturbação reduz os erros causados por oscilação em torno do MPP, mas o maior desvio do MPP ocorre sob rápidas mudanças das condições atmosféricas, devido à lenta resposta.

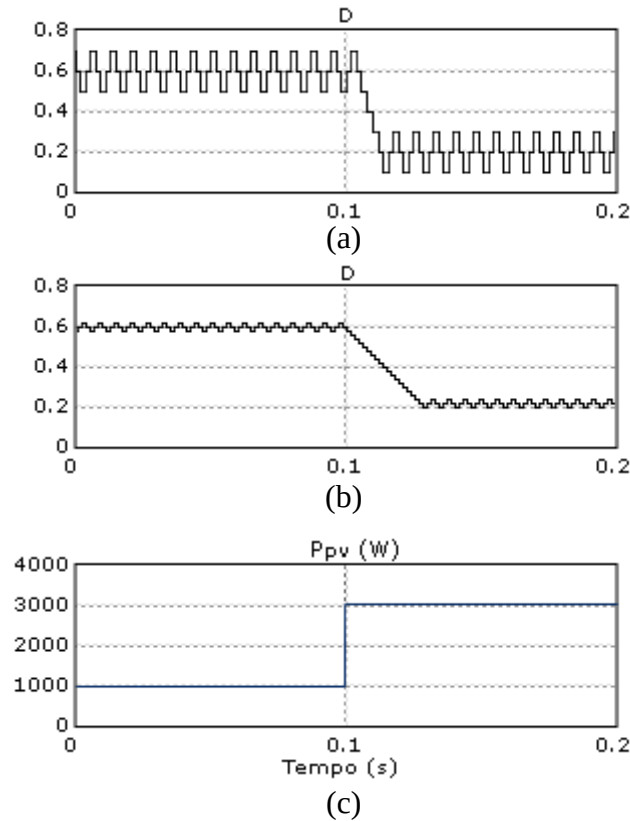


Figura 36: Influência do valor incremental da perturbação. (a) Valor de perturbação grande; (b) Valor de perturbação pequeno; (c) Potência do painel solar (FEMIA *et al.*, 2005)

Algumas melhorias foram introduzidas para que o tempo de rastreamento do ponto de máxima potência seja reduzido tais como (FEMIA *et al.*, 2005) e (TAN, GREEN, HERNANDEZ-ARAMBURO, 2005), mas em regime o sistema sempre terá flutuações na potência em torno do ponto máximo, dado que o algoritmo continuará produzindo perturbações a fim de avaliar o próximo ponto de operação. Esta é uma característica intrínseca do *P&O*. A fim de minimizar estas flutuações e o tempo de rastreamento foram propostos alguns modelos de controladores baseados na Lógica Fuzzy que serão expostos na próxima seção.

4.3 Métodos MPPT através da Lógica Fuzzy

4.3.1 Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy é uma área de pesquisa relacionada a Inteligência Computacional que se difundiu, ganhou vários adeptos e aplicações em várias áreas. Eles provêm a base para

geração de ferramentas poderosas para a solução de problemas, com uma vasta aplicabilidade, especialmente, nas áreas de controle e tomada de decisão.

A Lógica é baseada na teoria dos Conjuntos Fuzzy que foi estruturada em 1965 pelo Dr. Lofti A. Zadeh da Universidade da Califórnia para tratar e representar incertezas (ZADEH, 1978). Ela é uma generalização da teoria dos Conjuntos Clássicos. Na teoria clássica, os conjuntos são denominados "crisp" e um dado elemento do universo de discurso (U) pertence ou não pertence ao referido conjunto. A Lógica Fuzzy permite representar infinitos valores lógicos de pertinência (grau de verdade) intermediários que variam de 0 a 1 (falso ou verdadeiro respectivamente). Assim:

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]. \quad (31)$$

Estes valores indicam o Grau de Pertinência dos elementos do conjunto U em relação ao conjunto A, isto é, quanto é possível para um elemento x de U pertencer ao conjunto A.

Tal função é chamada de Função de Pertinência e o conjunto A é definido como Conjunto Fuzzy.

Os conjuntos são rotulados qualitativamente (usando termos linguísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos destes conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (grau em que um elemento pertence a um conjunto). Por exemplo, um homem de 1,80 metros e um homem de 1,75 metros são membros do conjunto “alto”, embora o homem de 1,80 metros tenha um grau de pertinência maior neste conjunto. A Lógica Fuzzy torna-se importante na medida em que o mundo em que vivemos não é constituído por fatos absolutamente verdadeiros ou falsos.

A Figura 37 ilustra em forma de blocos o funcionamento de um controlador Fuzzy. Os sinais de entrada são obtidos da planta através de sensores ou outro sistema de medição que através do tratamento adequado do sinal analógico alimentam o bloco de fuzificação (Fuzzy sets) do controlador Fuzzy. Através da base de conhecimento armazenada por meio de um conjunto de regras disparadas através de um mecanismo de inferência, as decisões são tomadas e os consequentes das regras Fuzzy resultantes são devolvidas ao sistema ainda em linguagem Fuzzy. O bloco de defuzificação efetua a conversão em informações no formato “crisp” que é disponibilizada na saída do controlador para que seja efetuada a mudança de estado.

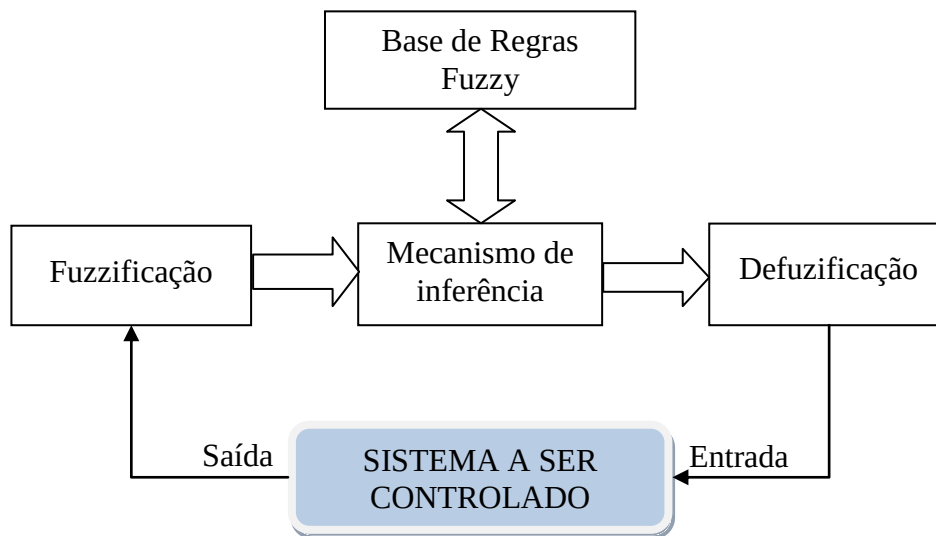


Figura 37: Diagrama de blocos do controlador Fuzzy

O controle fuzzy substitui o papel do modelo matemático por um conjunto de regras que descrevem o comportamento do sistema. Neste conjunto são definidas as regras que são disparadas quando submetidas às entradas que representam as condições do estado do sistema a ser controlado. A Lógica Fuzzy apresenta diversas vantagens tais como:

- É conceitualmente fácil de ser entendida por ser baseada na linguagem natural;
- Tem flexibilidade para aplicação prática tanto em hardware como em software;
- Apresenta boa tolerância a imprecisão de dados;
- Modelo não-linear que se ajusta a sistemas de vários níveis de complexidade;
- Sistemas de controle baseados na Lógica Fuzzy podem ser construídos com base na experiência dos especialistas;
- Pode ser usado para tratamento da incerteza;
- Hibridização com outras técnicas de controle da área de inteligência artificial, ou de controle clássico.

Para o conhecimento sobre a teoria dos conjuntos Fuzzy recomenda-se a leitura de (ZADEH, 1978), (MENDEL, 1998), (COX, 1994), (PEDRYCZ, GOMIDE, 1998), (KLIR, BO YUAN, 1995), (KLIR, FOLGER, 1988) e (ZIMMERMANN, 2001).

Abaixo se apresentam dois controladores baseados na Lógica Fuzzy. No primeiro e mais simples, é feita uma estimativa de MPP por inferência de corrente do painel usando um modelo PI. No segundo caso, o rastreamento é realizado por eliminação do erro em torno do ponto de máxima potência. Neste caso existem algumas variações em relação ao modelo do

controlador apresentados em (KHAEHINTUNG *et al.*, 2005) (KHAEHINTUNG, SIRISUK, 2007) (PATCHARAPRAKITI, PREMRUDEEPPREECHACHARN, 2002) (TAHERBANEH, MENHAJ, 2007) (TSAI-FU WU, CHIEN-HSUAN CHANG, YU-HAI CHEN, 2000), onde o maior foco é dado na variação da potência do painel em relação à tensão. Neste trabalho o controlador será baseado na variação da potência pela variação da corrente.

4.3.2 Estimador Fuzzy de MPPT por inferência de corrente PV

O desempenho do método MPPT por inferência de corrente de máxima potência do painel fotovoltaico (I_{ref}) através da Lógica Fuzzy proposta neste trabalho depende do conhecimento que se tem das curvas características deste painel. Uma vez que se conhecem alguns pontos máximos desta curva, pode-se montar uma base de dados que servirá de base para criar os conjuntos e as regras que irão definir o comportamento do sistema. Sem a necessidade de se mapear todas as combinações possíveis entre entradas e saídas. A grande vantagem do método por inferência está na sua simplicidade de implementação e numa resposta satisfatória quando comparado com outros métodos tradicionais como “*lookup tables*”.

Neste caso, para que o sistema opere em potência máxima, a configuração de variáveis de entrada do Sistema Fuzzy são irradiação solar e temperatura ambiente e a corrente de referência do painel fotovoltaico é definida como saída do Sistema Fuzzy. Essa corrente será comparada com a corrente de operação do painel resultando num erro que será enviado para um controlador PI responsável por produzir o sinal modulante. A Figura 38 mostra o diagrama de blocos deste controle.

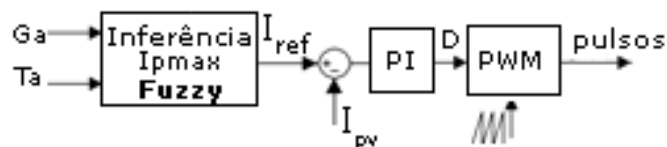


Figura 38: Diagrama de blocos de controle Fuzzy por Inferência de I_{pv} .

A Figura 39 apresenta os conjuntos Fuzzy e as funções de pertinência relativas às variáveis de entrada e saída. As funções de pertinência para as variáveis mencionadas acima são: positivo muito alto (PMA), positivo alto (PA), positivo baixo (PB), negativo baixo (NB), negativo alto (NA), negativo muito alto (NMA).

Os formatos dos conjuntos Fuzzy da variável de saída I_{ref} não acompanha os formatos dos conjuntos das variáveis de entrada. Este aspecto é um pouco incomum, mas como a modelagem deste controlador é feita de forma que a superfície Fuzzy represente a curva característica PV, o modelo deve ser dividido em áreas. Cada área tem um comportamento típico, resultando em conjuntos mais ou menos espaçados.

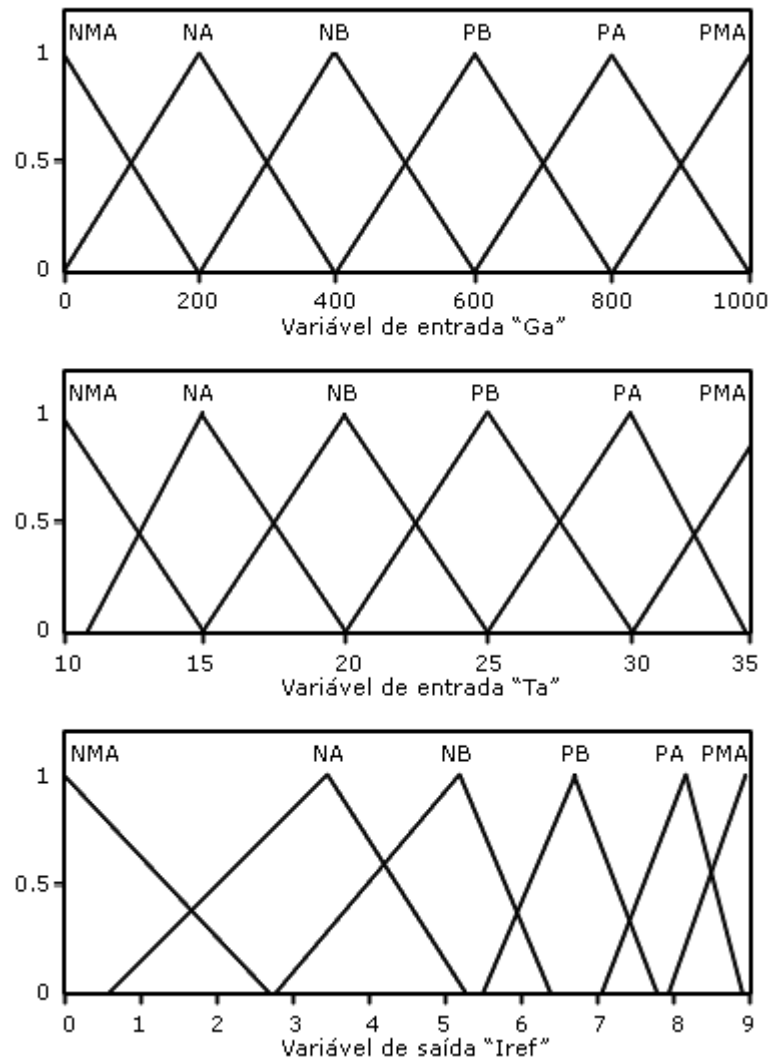


Figura 39: Funções de pertinência para o estimador MPPT Fuzzy por inferência de corrente do painel fotovoltaico.

Cada entrada possui 6 funções de pertinência, que foram totalmente combinadas resultando em 36 regras mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Regras Fuzzy para o método de inferência de I_{pv} .

Ga Ta	NMA	NA	NB	PB	PA	PMA
NMA	NA	NA	NB	PB	PMA	PMA
NA	NMA	NA	NB	PB	PA	PMA
NB	NMA	NA	NA	NB	PB	PA
PB	NMA	NA	NA	PB	PB	PA
PA	NMA	NMA	NB	NB	PB	PA
PMA	NMA	NMA	NB	PA	PB	PA

Um exemplo das regras é a seguinte:

Se a irradiação for muito alta e a temperatura ambiente for muito baixa, I_{ref} é muito alta.

Em termos de variáveis Fuzzy:

IF G_a is PMA AND T_a is NMB THEN I_{ref} is PMA.

A saída I_{ref} é um valor real, resultado da variável linguística de saída do controlador que foi inferida pelas regras Fuzzy (defuzificação). Alguns métodos de defuzificação são utilizados tais como centro da área (ou centróide), centro do máximo e a média do máximo. O processo de defuzificação utilizado foi o método do centro de área frequentemente chamado de centro de gravidade, pois ele calcula o centróide da área que é composta pelo resultado das operações entre os conjuntos Fuzzy. O método centróide encontra-se detalhado no [Apêndice C].

Normalmente a modelagem baseada em Lógica Fuzzy necessita de um especialista capaz de determinar as regras e forma dos conjuntos fuzzy. As regras e os conjuntos também podem ser ajustados de forma automática através modelos híbridos que buscam otimizar os diversos parâmetros envolvidos.

A corrente de referência fornecida pelo controlador Fuzzy é referente a um único painel. Com base nos dados do catálogo do painel e algumas curvas características conhecidas, a base de regras pôde ser montada. Esta corrente deve ser multiplicada pelo número de painéis em paralelo do arranjo fotovoltaico. Isto limita a propagação de erros de projeto e permite que qualquer número de painéis possa ser colocado em paralelo sem haver necessidade de modificar o controlador.

O controle Fuzzy por inferência de corrente PV foi simulado para as mesmas condições de operação de irradiação e temperatura ambiente que foram usados para o método MPPT por I_L . Os resultados estão mostrados na Figura 40.

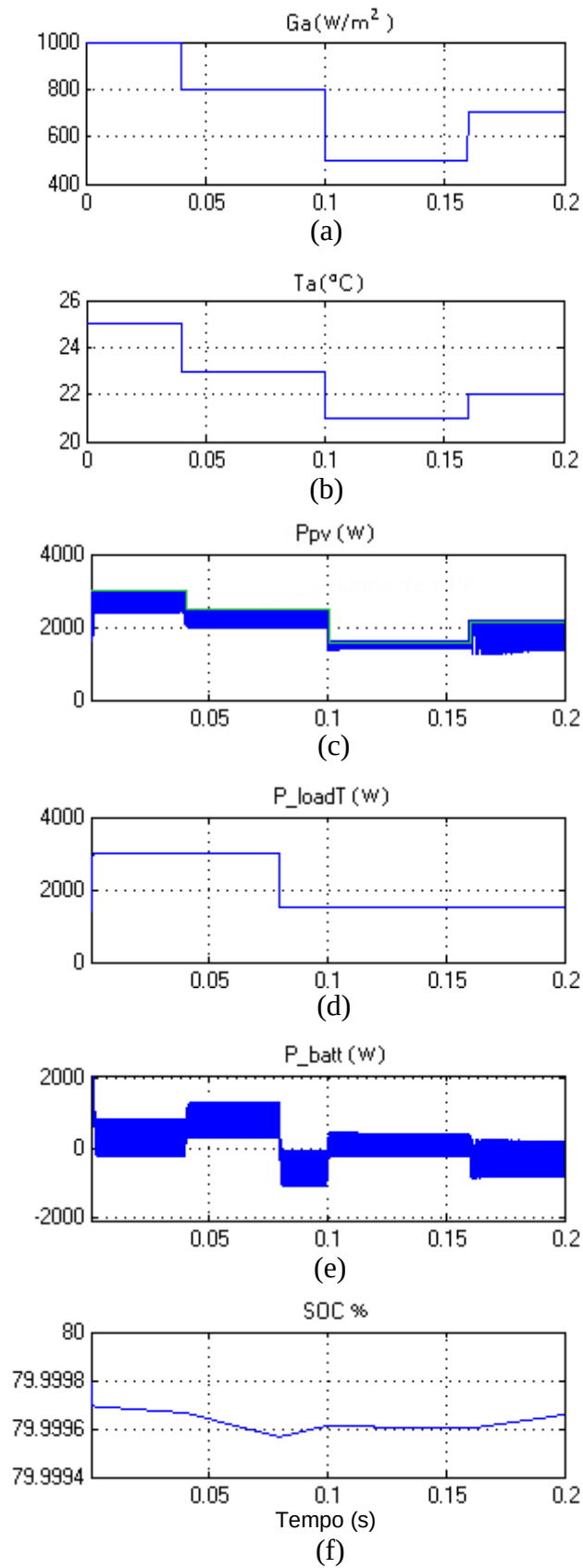


Figura 40: Simulação do MPPT pelo método Fuzzy de inferência de corrente I_{pv} . (a) G_a - Irradiação solar; (b) T_a - Temperatura ambiente; (c) P_{pv} - Potência do arranjo PV; (d) P_{loadT} - Potência total da carga; (e) P_{batt} - Potência do banco de baterias; (f) SOC - Estado de carga da do banco de baterias.

Observa-se que o controle estima o ponto de máxima potência com rápida variação da irradiação e da temperatura (G_a e T_a) mostradas na Figura 40(a) e Figura 40(b), respectivamente, mas com um nível elevado de *ripple* de potência (Figura 47(c)). Observa-se que de 0,1 a 0,16 segundos, o *ripple* é menor que nos demais intervalos de tempo. Nesta faixa o controlador estima uma potência máxima mais próxima do valor teórico fornecido pela curva característica.

O alto nível de *ripple* de potência do arranjo PV contribui para um alto *ripple* da potência do banco de baterias (Figura 40(e)). Quando as cargas conectadas ao sistema (Figura 40(d)) demandam mais potência do que a disponível pela fonte PV (instante 0,04 a 0,08 segundos), o banco de baterias fornece o excedente de energia. Caso contrário, o banco de baterias é recarregado (instantes 0,08 a 0,1 segundos e 0,16 a 0,2 segundos). O ruído de potência causa uma pequena inclinação no gráfico de carga e descarga (Figura 40 (f)) do banco de baterias, mesmo nos intervalos em que a energia da fonte PV é igual ao demandado pela carga.

O modelo de controle Fuzzy por inferência de corrente PV pode ser melhorado de diversas formas. Uma delas é realizar ajustes nos conjuntos Fuzzy existentes ou incluir na modelagem, mais conjuntos derivados de curvas características do painel fotovoltaico em pontos conhecidos. Uma vez que se tem o modelo PV, podem-se extrair curvas características para todos os intervalos desejados. No presente estudo optou-se por utilizar o máximo de curvas características disponibilizadas em *data-sheets* (cinco curvas como mostrado no catálogo do ANEXO 3), de forma que este modelo de controle possa ser aplicado em casos em que não há disponibilidade de um modelo PV, a partir do qual possa extrair as curvas características.

4.3.3 MPPT através do método Fuzzy por inferência do ciclo de trabalho

Como no caso anterior, o modelo de controle através da Lógica Fuzzy requer o conhecimento de especialistas ou uma base de dados para definição dos parâmetros de operação de controle e o controlador poderá ser tão bom quanto forem as competências envolvidas no projeto ou a disponibilidade de dados.

O controle por Lógica Fuzzy com parâmetros variáveis é vantajoso quando há mudança de condições de funcionamento da planta a ser controlada. Devido à complexidade de se desenvolver controles com parâmetros variáveis, este trabalho utiliza parâmetros que

estão relacionadas com o comportamento da curva característica do painel solar em si: a velocidade do seu deslocamento e a sua direção. De forma geral, o MPPT tenta 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/dI é igual a zero na curva da Figura 41. Para qualquer intervalo de operação, à esquerda do MPP esta derivada é positiva e negativa à sua direita.

Para se calcular a derivada, usou-se uma função de erro, expressa por:

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-6)}{I_{pv}(k) - I_{pv}(k-6)} . \quad (32)$$

Ao invés de se usar a variação imediatamente anterior da potência e da corrente ($k-1$), foi necessário utilizar a variação de seis ciclos de controle ($k-6$). Este é o menor valor empírico, resultante de vários testes realizados através de um processo heurístico, que melhor representa o deslocamento ao longo da curva característica da Figura 41. O maior espaçamento entre uma amostra e outra se deve a problemas de ruído na potência do painel PV inerente a ruídos de chaveamento causados pelo uso de conversores eletrônicos chaveados. A eficiência deste método depende do cálculo correto do erro e da tradução do seu comportamento para a tabela da base de regras.

Ao erro associa-se uma variação, expressa por:

$$dE(k) = E(k) - E(k-6) . \quad (33)$$

Espera-se que um sistema de controle bem ajustado conduza a função erro e a variação do erro para zero, e o MPP pode ser alcançado. Para essa operação foi desenvolvido um controlador baseado em Lógica Fuzzy.

A Figura 41 apresenta o funcionamento do modelo usando a curva característica P-I 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 I_{pv} é

provocado por um aumento de $D(k)$ e a diminuição de I_{pv} é provocado por uma diminuição de $D(k)$. De forma geral, pode-se escrever que:

Ponto **A**: se $E(k) > 0$ e $dE(k) < 0$ [$E(k) < E(k-6)$], então $D(k) > 0$;

Ponto **A**: se $E(k) > 0$ e $dE(k) > 0$ [$E(k) > E(k-6)$], então $D(k) < 0$;

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

Ponto **C**: se $E(k) < 0$ e $dE(k) < 0$ [$E(k) < E(k-6)$], então $D(k) < 0$;

Ponto **C**: se $E(k) < 0$ e $dE(k) > 0$ [$E(k) > E(k-6)$], então $D(k) > 0$.

Ao contrário do que pode parecer, provocar um grande aumento de I_{pv} não irá, necessariamente, aumentar a potência. Pelo contrário, irá ultrapassar o MPP e conduzir o arranjo PV para a corrente de curto circuito I_{sc} .

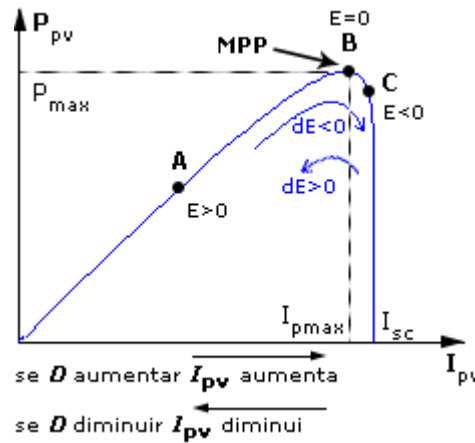


Figura 41: Curva característica P-I de um módulo PV.

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

regra (i): IF $E(k)$ is M_i and $dE(k)$ is N_k THEN $dD(k)$ is Z^i

onde M_i , N_k e Z^i 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 42 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.

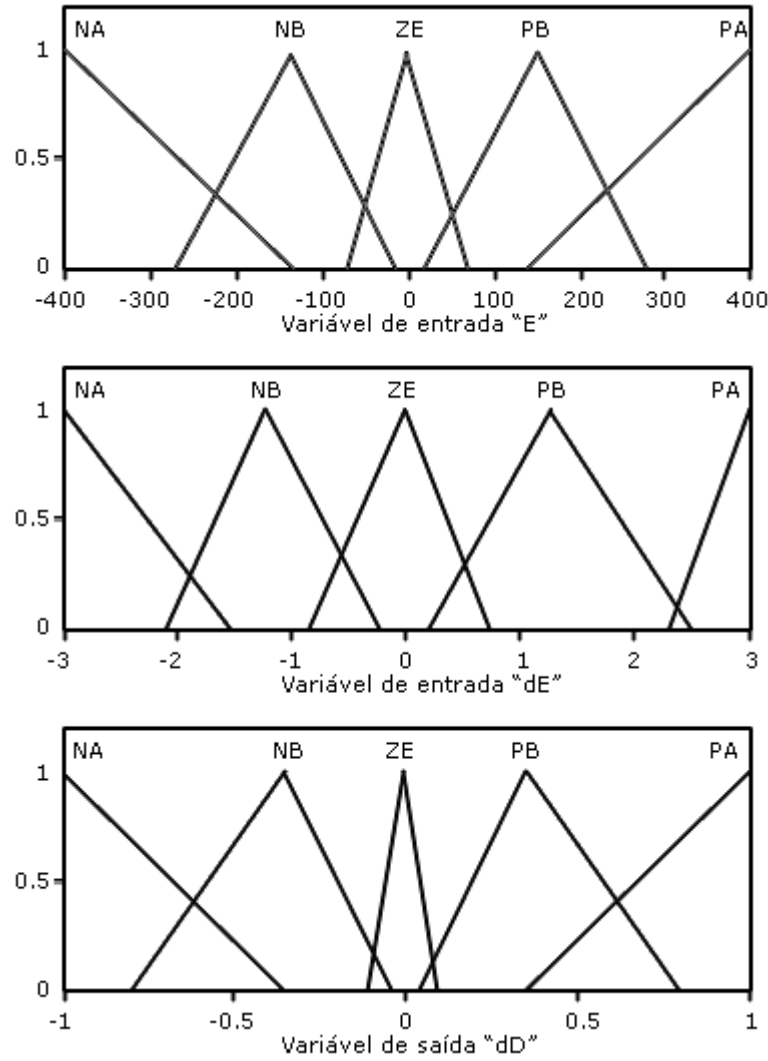


Figura 42: Funções de pertinência do método Fuzzy por dP/dI com saída dD .

Nesse sistema também foi usado o método da centróide para defuzzificação. Nesse caso, o cálculo do centróide da variável de saída $dD(k)$, que corresponde à variação do índice de modulação que influencia diretamente o *duty cycle*, é a variável de controle de saída expressa por:

$$dD(k) = \frac{\sum_{k=1}^m dD^k \omega_k}{\sum_{k=1}^m \omega_k}, \quad (34)$$

onde ω_k é um coeficiente ou o peso (grau de pertinência da função) e dD^k é um valor que corresponde a função de pertinência de $dD(k)$.

A Tabela 4 mostra as regras de controle que determinam o valor de $dD(k)$ para qualquer par de entrada $E(k)$ e $dE(k)$.

Tabela 4: Tabela da base de regras para MPPT Fuzzy através de dD .

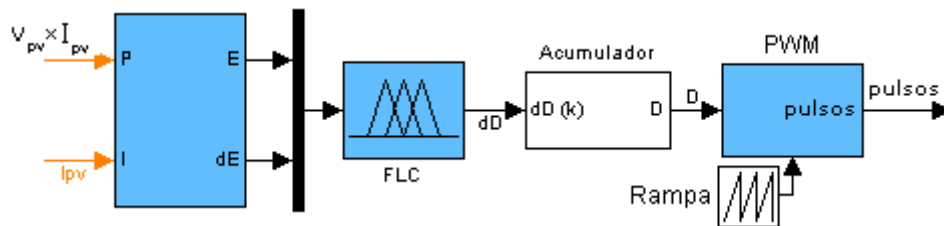
$\begin{matrix} dE \\ E \end{matrix}$	NA	NB	ZE	PB	PA
NA	NA	NA	NA	ZE	ZE
NB	NB	NB	NB	ZE	ZE
ZE	ZE	NB	ZE	PB	ZE
PB	ZE	ZE	PB	PB	PB
PA	ZE	ZE	PA	PA	PA

A cada ciclo do processo de controle, o controlador calcula a variação do índice de modulação $dD(k)$ para atualizar o valor de $D(k)$ através de um acumulador expresso por:

$$D(k) = D(k-6) + K_D dD(k), \quad (35)$$

onde K_D é igual a 0,1 e corresponde à constante de atualização de $D(k)$ (KHAEHINTUNG *et al.*, 2005).

A Figura 43 apresenta o diagrama de blocos do controlador Fuzzy para rastreamento do MPP através da variação do índice de modulação e neste caso do *duty cycle*, já que são diretamente proporcionais.

Figura 43: Diagrama de blocos do controlador Fuzzy através de dD .

A técnica que utiliza diretamente a variável $D(k)$ como saída Fuzzy ao invés de $dD(k)$ foi utilizada em (XIAO-BO LI, KE DONG, HAO WU, 2008). Em uma primeira abordagem, esta técnica também foi adotada neste trabalho com o objetivo de rastrear o MPP. À primeira vista, a escolha desta variável pode parecer natural dado que $D(k)$ é o parâmetro que afeta diretamente a dinâmica do sistema. Neste caso o algoritmo Fuzzy fornece uma saída em valor do índice de modulação que controla a planta através de um modulador PWM, como mostra a Figura 44.

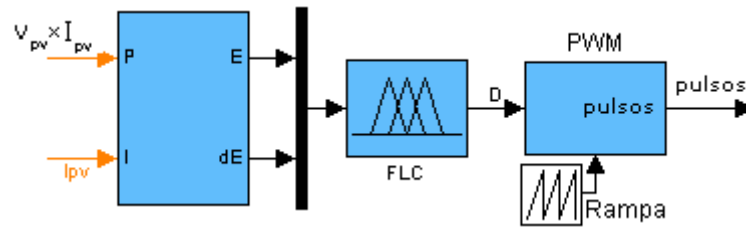


Figura 44: Diagrama de blocos do controlador Fuzzy através de $D(k)$.

A variação de *duty cycle* através da variação do índice de modulação traz o conceito de oscilação em torno do ponto máximo. Note-se que, uma vez que for atingido este ponto, a potência pode diminuir por excesso de corrente que conduz ao I_{sc} (para a direita da curva característica da Figura 41), ou por falta de corrente (para a esquerda). Assim, $D(k)$ deve ser ajustado, incrementando ou decrementando um pequeno valor proporcional à deslocação da potência necessária para voltar ao MPP.

A Figura 45 mostra o acumulador usado, onde a constante de atualização K_D é necessária dado que a saída Fuzzy é normalizada.

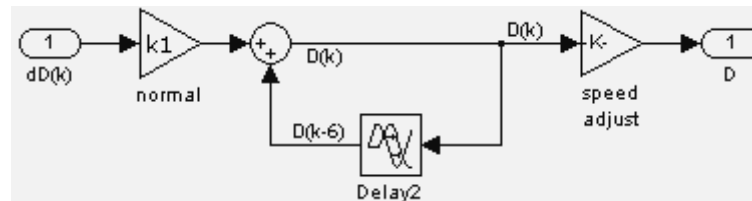


Figura 45: Acumulador.

A normalização permite que para diversos universos de discurso das variáveis de entrada, ou seja, ambientes diferentes outras plantas e inclusive outros sistemas baseados no mesmo princípio de controle, se possa aplicar o mesmo modelo de controle aqui apresentado. Neste caso, a saída do controlador também foi normalizada. Este aspecto foi fundamental para a eficiência do controle porque, a dinâmica de resposta da planta é muito lenta em relação à velocidade com que o controlador Fuzzy envia o sinal que realiza a mudança de estado da planta.

O resultado da variação de D em função da potência é mostrado na Figura 46.

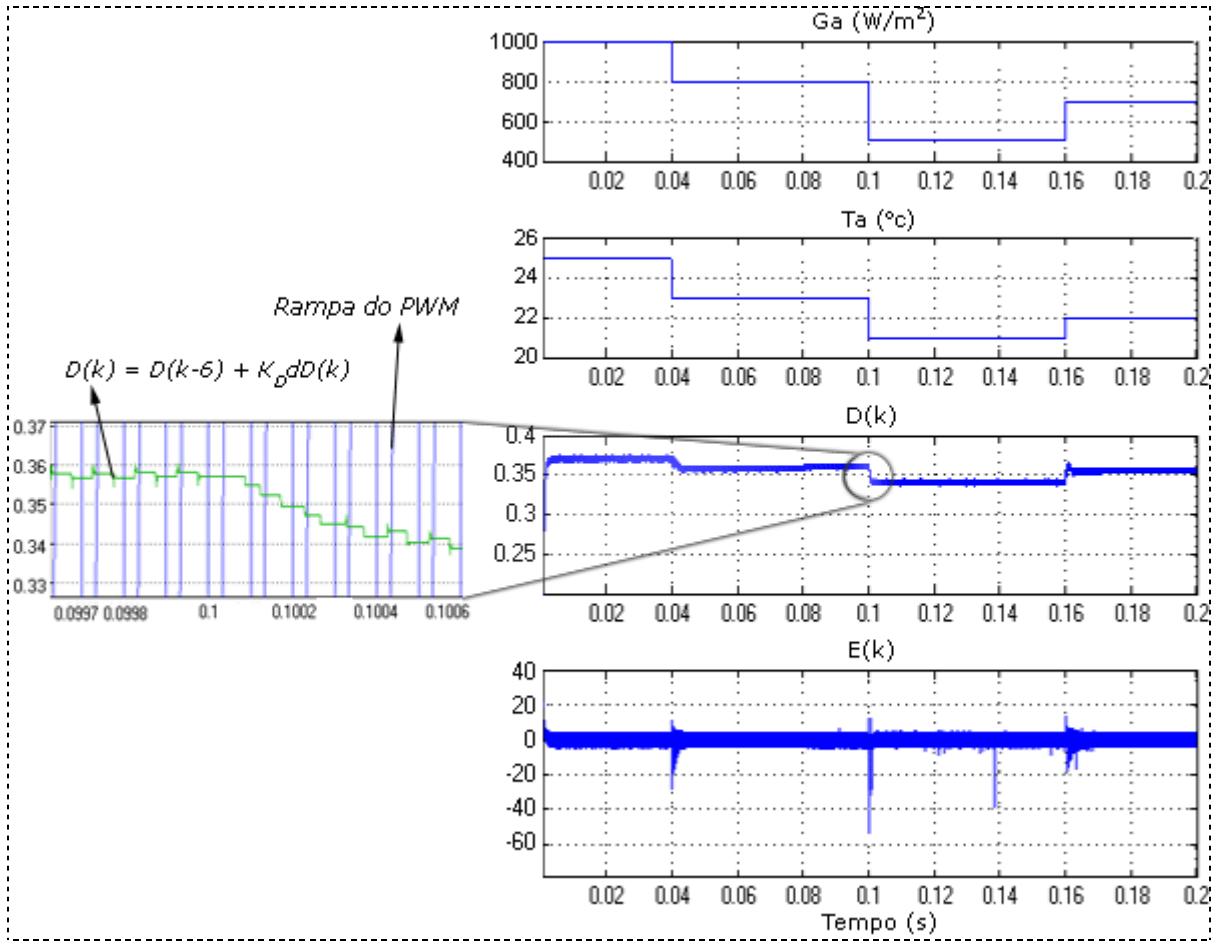


Figura 46: Variação do índice de modulação $D(k)$ e do erro $E(k)$, em relação à variação da Irradiação, G_a , e da Temperatura, T_a .

Observa-se que cada mudança de irradiação e temperatura gera um erro $E(k)$, Equação (32), que o controle minimiza incrementando ou decrementando $D(k)$ de acordo com a necessidade. Este controlador independe do tipo ou configuração do arranjo PV. Desde que haja uma diferença de potência em relação à corrente do painel, o erro $E(k)$, e a direção desse erro, $dE(k)$, o controlador será capaz de rastrear o ponto de máxima potência.

A Figura 47 mostra os resultados da simulação em que a potência do painel fotovoltaico pode ser vista para os modelos de controle Fuzzy com saída em $D(k)$ e em $dD(k)$. A variação da irradiação e da temperatura é a mesma usada para os casos anteriores.

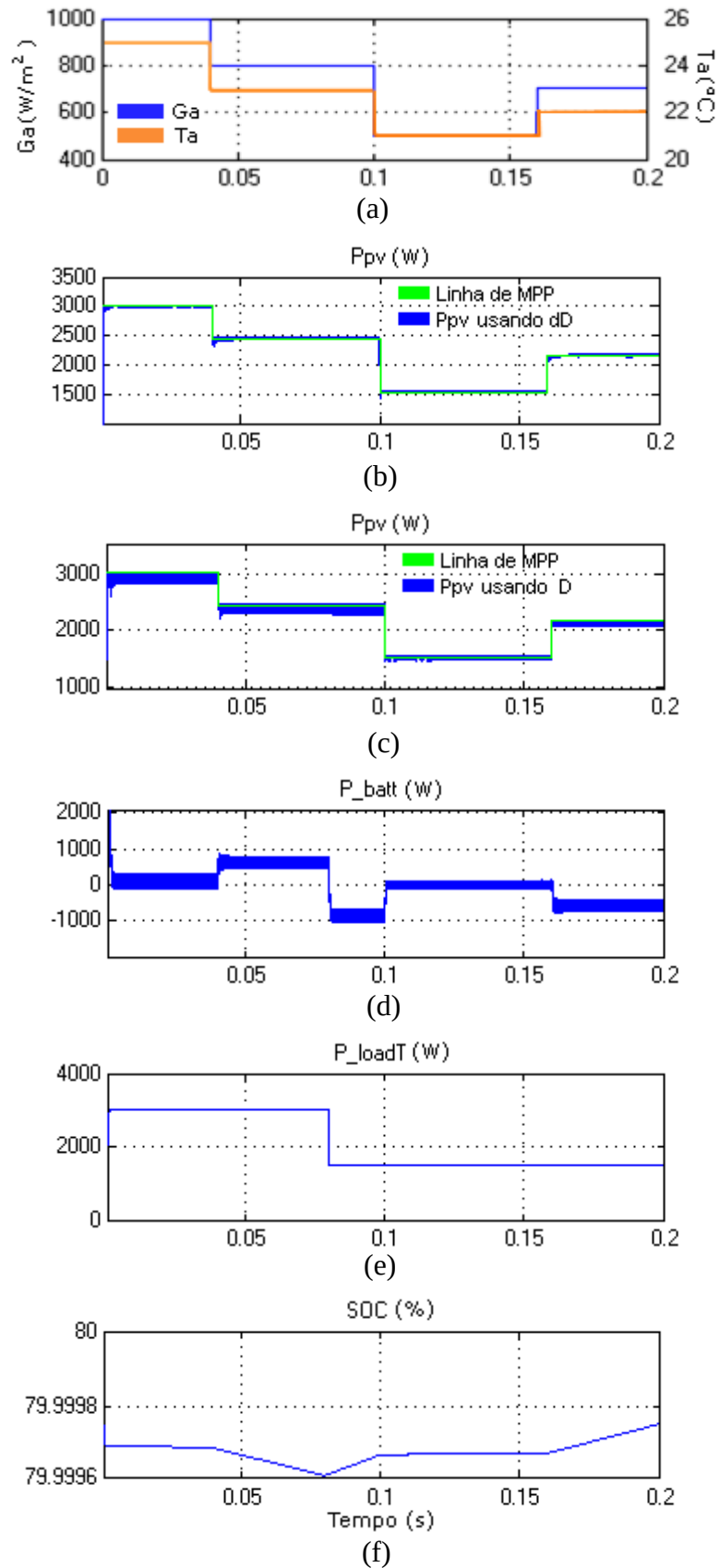


Figura 47: MPPT através do método Fuzzy por dP_{pv}/dI_{pv} . (a) G_a - Irradiação solar, T_a - Temperatura ambiente; (b) P_{pv} - Potência do arranjo PV com saída Fuzzy dD ; (c) P_{pv} - Potência do arranjo com saída Fuzzy D ; (d) P_{loadT} - Potência total da carga; (e) P_{batt} - Potência do banco de baterias; (f) SOC - Estado de carga da do banco de baterias.

Os resultados mostram que o ponto de máxima potência controlada diretamente por $D(k)$ (Figura 47(c)) é rastreado com rapidez, mesmo para condições de rápida variação de irradiação e temperatura ambiente (instantes 0,04; 0,1 e 0,16 segundos da Figura 47(a)), e com *ripple* menor do que o modelo Fuzzy por inferência de corrente apresentada na Seção 4.3.2. Apesar disso, o modelo Fuzzy com saída em $D(k)$ apresenta a desvantagem de ser pouco flexível em caso de se precisar alterar a planta. Isto porque na modelagem do controlador é considerado um valor fixo de $D(k)$, que varia de 0 a 1. Não existem variações incrementais ou decrementais de $D(k)$ na direção do rastreamento. Baseado nas medidas das variáveis de entrada (erro e variação do erro) o controlador fornece diretamente um novo valor de $D(k)$ que deverá conduzir o sistema para a operação em potência máxima a cada ciclo de controle. Muitas vezes este novo valor de $D(k)$ 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.

O ponto de potência máxima rastreada por $dD(k)$, Figura 47(b), também é alcançada em poucos ciclos de controle, mesmo para condições de rápida mudança de irradiação, temperatura ambiente e na carga, com percentagem de *ripple* menor que em todos os demais modelos apresentados. Isto acontece porque em regime, a saída deste controlador Fuzzy é zero e o ponto de máxima potência não é movido até a próxima mudança nas condições de irradiação e temperatura ambiente. Este fato contribui para um funcionamento menos oscilante da potência do banco de baterias (Figura 47 (d)). Observa-se que em todo o intervalo de simulação quando as cargas conectadas ao sistema (Figura 47(e)) demandam mais potência do que a disponível pela fonte PV (instante 0,04 a 0,08 segundos), o banco de baterias fornece o excedente de energia a fim de compensar essa falta de energia. Caso contrário, quando a carga demanda menos energia do que a disponível pela fonte PV, o banco de baterias é recarregado através do conversor *Boost* (instantes 0,08 a 0,1 segundos e 0,16 a 0,2 segundos). O banco de baterias não é forçado a constantes cargas e descargas (Figura 47 (f)) fornecendo potências menos ruidosas e prolongando sua vida útil. Nos demais intervalos a energia da fonte PV é igual ao da carga.

Devido ao bom desempenho do método Fuzzy dP/dI com saída $dD(k)$, este método será explorado mais adiante numa planta fotovoltaica baseada no conversor *multi-string*.

Método Fuzzy por dP_{pv}/dV_{pv} .

Para o cálculo do erro $E(k)$ e sua variação $dE(k)$ pode também ser usado a variação da potência do painel em relação à variação da tensão (KHAEHINTUNG *et al.*, 2005) (PATCHARAPRAKITI, PREMRUDEEPREECHACHARN, 2002) (KHAEHINTUNG, SIRISUK, 2007) (TAHERBANEH, MENHAJ, 2007) como mostra a Equação 36.

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-6)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-6)} \quad (36)$$

A ela associa-se uma variação, expressa por:

$$dE(k) = E(k) - E(k-6) \quad (37)$$

Observa-se na Seção 3.3.1.1, que a relação entre a tensão no *Boost* e o *duty cycle* é inversa à relação entre a corrente no *Boost* e o mesmo *duty cycle*. Apesar desta relação indicar que o mesmo sistema de controle Fuzzy projetado para o caso em que o controlador utiliza a variação da potência do arranjo PV em relação à variação da corrente do arranjo fotovoltaico (dP/dI) possa ser aplicado, desde que a lógica seja invertida (o que significaria multiplicar a saída Fuzzy do caso dP/dI por -1), isto não se deu na prática com a mesma eficiência conforme mostra a Figura 48.

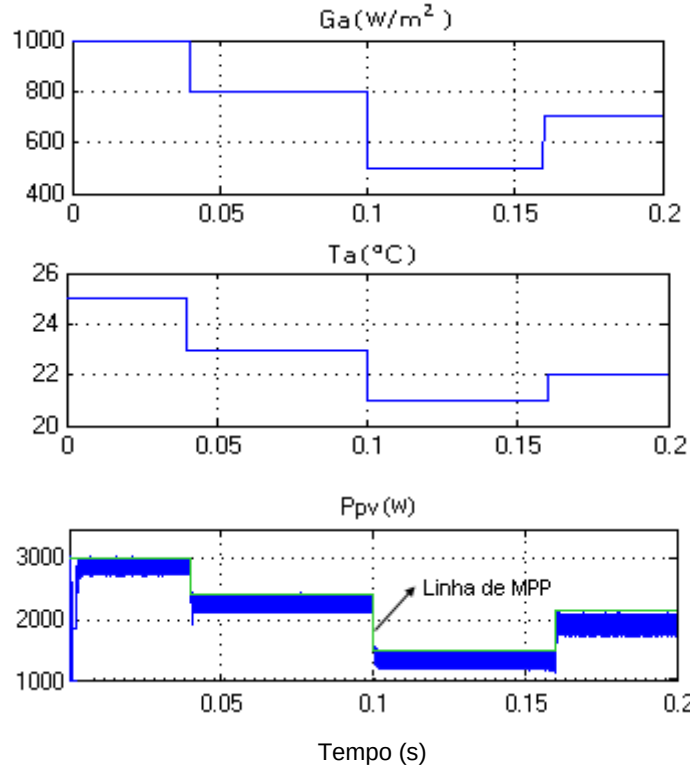


Figura 48: Potência do arranjo PV pelo método MPPT Fuzzy por $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ e saída $dD(k)$.

Observa-se nos resultados que o arranjo PV teve um melhor desempenho para o caso dP/dI do que para o presente caso dP/dV quanto aos níveis de *ripple* de potência. O que não quer dizer que este método não é eficiente, mas que simplesmente inverter a lógica não é suficiente para fazer com que o método MPPT Fuzzy por dP/dV rastreie o MPP com eficiência. Ocorre que a variação dada por dP/dI é igual à variação da tensão (dV), que no painel fotovoltaico varia muito pouco com a variação da irradiação (ver Figura 12). A tensão PV sofre apenas uma pequena influência da temperatura. No caso atual há a variação dP/dV que corresponde à variação da corrente (dI). Este parâmetro tem uma grande variação com a variação da irradiação e quase não sofre influência da temperatura ambiente. Devido a este aspecto, pode ser natural que neste modelo apareçam maiores oscilações na potência causadas pela grande variação da corrente PV.

4.4 Análise comparativa da corrente RMS e da potência em VA

A análise dos valores das correntes eficazes e dos valores das potências em VA é importante para avaliar as perdas do sistema e indispensável para o dimensionamento dos componentes eletrônicos.

A Figura 48 mostra as correntes em *RMS* máximas medidas no indutor, na chave MOSFET e no diodo do conversor *Boost* para cada modelo de rastreamento do ponto de máxima potência apresentado neste estudo. Observa-se que os modelos de controle que apresentaram maiores níveis de *ripple* na potência requerem maiores níveis de corrente *RMS*. Desta forma, o método *Perturb and Observe* que usa como referência de controle a corrente do painel PV (I_{pv_ref}) apresenta maior corrente *RMS* em todos os dispositivos de potência medidos, seguido pelo modelo Fuzzy por inferência de corrente PV. O método *Perturb and Observe* por I_{L_ref} apresenta menor corrente *RMS* no indutor e no diodo $d2$, enquanto que o método Fuzzy por dP/dI e dP/dV com saída em $dD(k)$ apresentaram menores níveis de corrente *RMS* no MOSFET. O impacto desses resultados numa implementação prática dependerá de uma avaliação de custos para uma dada aplicação. Portanto, a escolha do algoritmo de controle de MPPT pode influenciar na potência entregue pelo sistema.

No entanto, é importante considerar que a diferença nas variações das correntes *RMS* pode ter várias causas, tais como os erros intrínsecos do próprio método MPPT, ajustes de controladores PI necessários em alguns modelos, e a sobreposição de *ripple* de potência do método MPPT com o *ripple* causado pela frequência de chaveamento. A influência de todos estes aspectos na corrente *RMS* e seus impactos no sistema são objetos interessantes para um novo estudo que poderá ser realizado em um trabalho futuro.

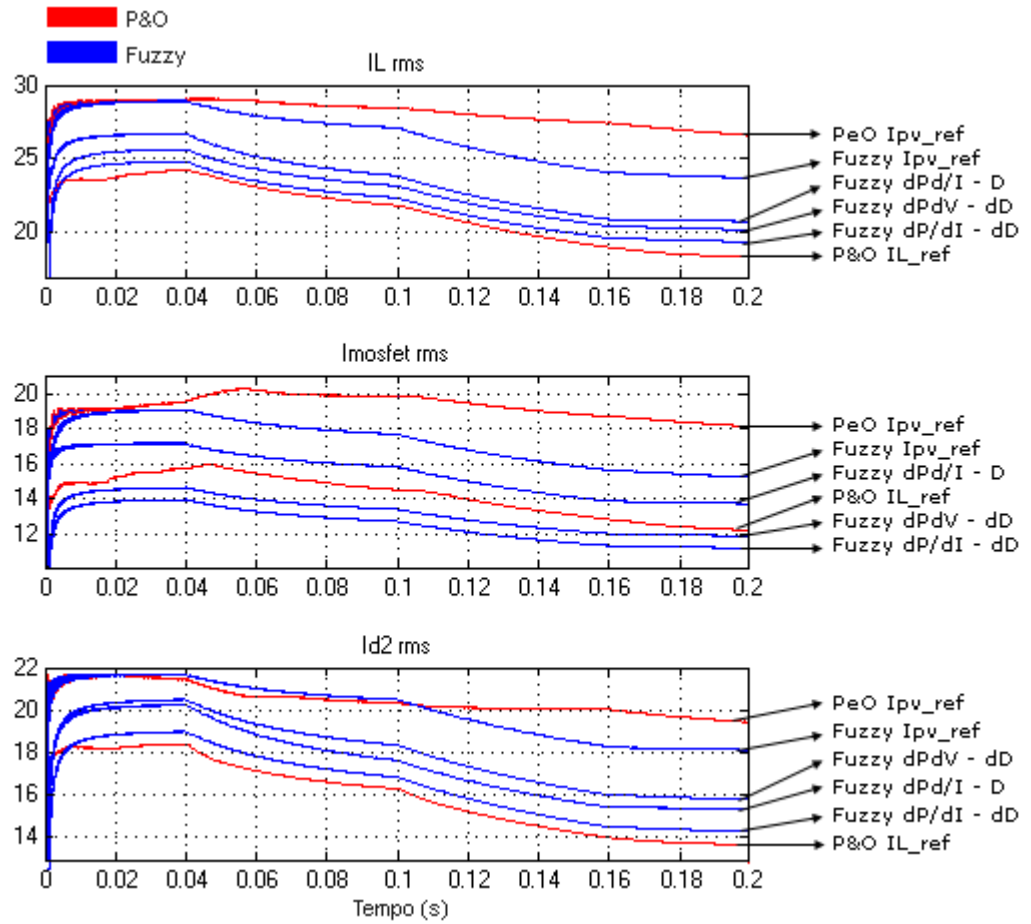


Figura 49: Correntes RMS no conversor *Boost*. (a) $I_{L\text{ rms}}$ – corrente rms no indutor; (b) $I_{mosfet\text{ rms}}$ – corrente rms na chave; (c) $I_{d2\text{ rms}}$ – corrente rms no diodo do conversor *Boost*.

Foram medidas as potências em VA máximas nos mesmos dispositivos usando Equação (38).

$$P_{PU\text{ max}} = \frac{I_{rms\text{ max}} V_{rms\text{ max}}}{P_{pv\text{ max}}} \quad (38)$$

Os resultados estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Potências em VA no conversor *Boost* de acordo com cada método MPPT.

Método	MOSFET	D2
P&O $I_{pv\text{ ref}}$	0.9687	0.8664
P&O $I_{L\text{ ref}}$	0.8163	0.7177
Fuzzy por inferência de I_{pv}	0.9531	0.8648
Fuzzy dP/dI saída $D(k)$	0.8993	0.7817
Fuzzy dP/dI saída $dD(k)$	0.7600	0.7268
Fuzzy dP/dV saída $dD(k)$	0.8235	0.8172

De forma geral as potências VA em PU seguem as correntes *RMS* de forma que os métodos Fuzzy dP/dI por $dD(k)$ e *P&O* por I_{Lref} tem menor valor de potência em VA no conversor, contribuindo para uma menor dissipação de energia no sistema. No entanto, a média da potência do controlador Fuzzy dP/dI por $dD(k)$ é menor do que todos os demais métodos. Por isso, e também por conta de sua maior complexidade e sensibilidade, é mais adequado para sistemas que necessitam de uma alta qualidade de energia onde há variações frequentes na irradiação e temperatura.

4.5 Sistema *multi-string*

Como foi observado no Capítulo 3, os sistemas isolados são na sua maioria centralizados, de baixa potência e de baixa confiabilidade. É de interesse o estudo de sistemas PV em outras configurações adequados a sistemas isolados para maior potência e que também necessitam de maior confiabilidade.

Nesta Seção considera-se um sistema baseado no conversor *multi-string* alimentado por dois arranjos fotovoltaicos mostrados no diagrama do circuito da Figura 50. O primeiro arranjo fotovoltaico é formado por 5 painéis BP SX3200 em série e 3 em paralelo, totalizando 3 kW de potência. O segundo arranjo é formado por 9 painéis KC130TM (do fabricante Kyocera) em série e 3 em paralelo totalizando 3510 W (+10% ou -5% - *data-sheet* no Anexo 3). Cada arranjo é conectado a um conversor *Boost* que opera com MPPTs independentes. Em ambos os casos, o método Fuzzy por dP_{pv}/dI_{pv} com saída $dD(k)$ foi usado por apresentar um melhor desempenho e por não haver necessidade de realizar nenhum ajuste a fim de adaptá-lo ao novo conjunto de painéis. Os dois *strings* PV e o banco de baterias estão conectados ao link CC e alimentam uma carga variável trifásica de 220V.

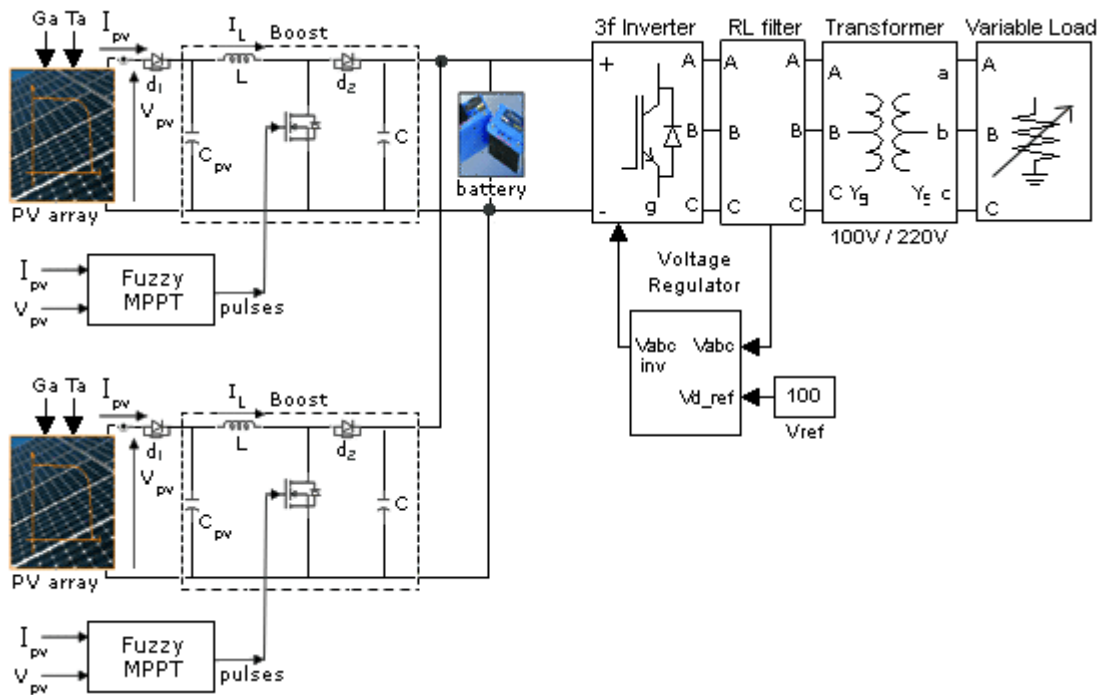


Figura 50: Sistema fotovoltaico isolado baseado no conversor *multi-string*.

Outros componentes para conversão de energia são usados, tais como inversor trifásico, filtro e transformador. Os resultados estão mostrados na Figura 51.

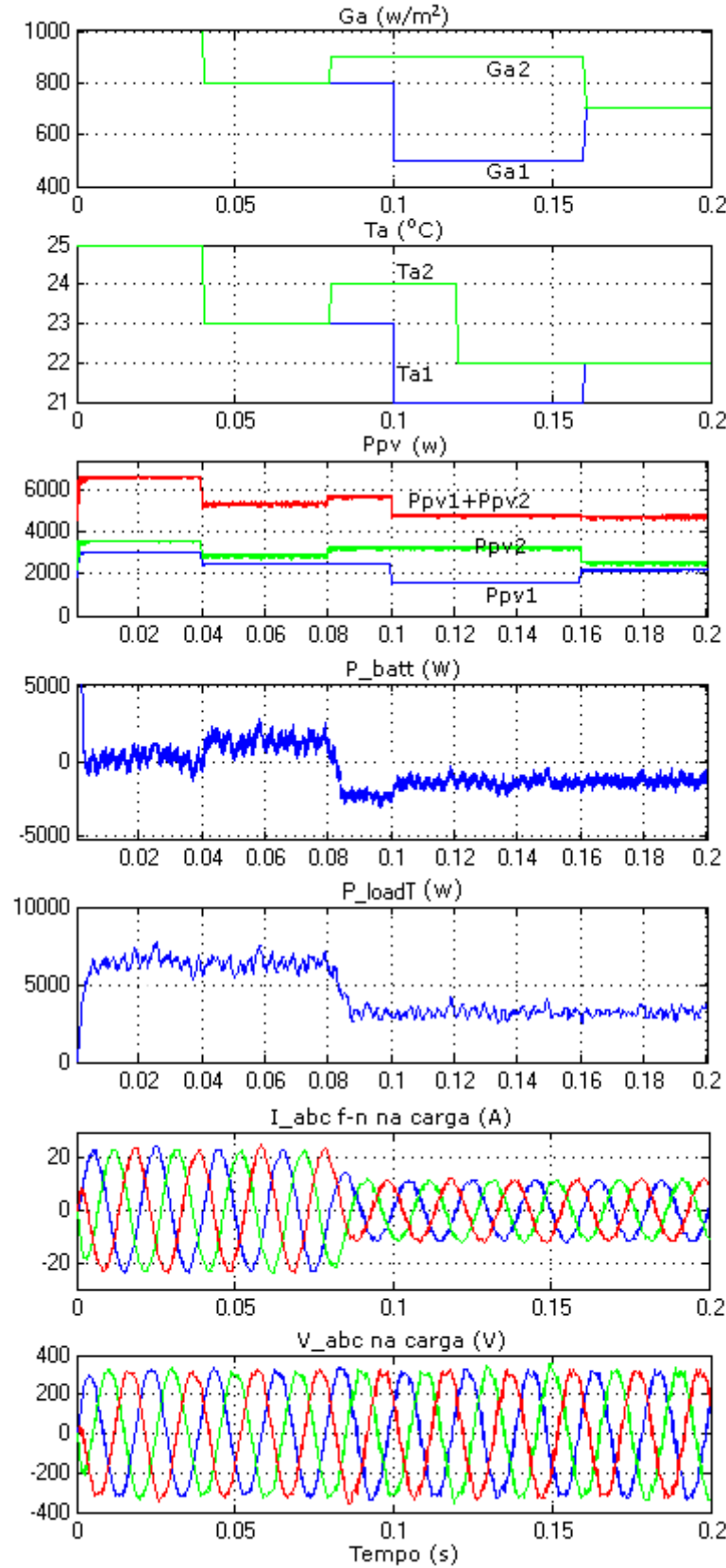


Figura 51: Resultados de simulação para o sistema *multi-string* isolado. G_a – Irradiação solar; T_a – Temperatura ambiente; P_{pv} – Potência dos arranjos PV; $I_{abc f-n na carga}$ – Corrente fase-neutro na carga; $V_{abc na carga}$ – Tensão entre as fases da carga.

Pode-se observar que o mesmo controle Fuzzy, opera em conversores distintos e rastreia o ponto de máxima potência dos dois conjuntos de painéis com características diferentes. P_{pv1} e P_{pv2} são as potências do arranjo PV um e dois respectivamente, e $P_{pv1} + P_{pv2}$ é a potência PV total do sistema. As tensões trifásicas e as correntes na carga estão em fase. Nota-se que este último reduz em 50% quando uma das cargas é desligada (instante 0,8 segundos). Os gráficos ainda mostram que a carga sofre pouca flutuação na tensão e na corrente mesmo quando há o suprimento de energia é alterada do conjunto de painéis para o banco de baterias.

Esses resultados denotam que o artifício da normalização dos universos de discursos das variáveis de entrada e saída, para o controle por Sistemas Fuzzy, permite que esse controle seja reutilizado com sucesso em outras configurações. Não se descarta a necessidade de pequenos ajustes em casos de comportamentos mais complexos em casos reais.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

N^O presente capítulo são apresentadas as conclusões a partir dos resultados de simulação obtidos e algumas sugestões para trabalhos futuros. Ao término deste trabalho foi possível concluir que, de forma geral, os objetivos inicialmente propostos foram atingidos.

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo PV que representa curvas características de painéis comerciais, com o objetivo de comparar diferentes métodos MPPT através da análise dos níveis de corrente *RMS* e potência VA no conversor CC-CC tipo *Boost*.

O desempenho do conversor *Boost* para rastreamento do ponto de máxima potência foi simulado através das estratégias de controle *Perturb and Observe* e por modelos baseados em Lógica Fuzzy. O sistema Fuzzy não precisa de modelagem matemática da planta que se deseja controlar.

Os resultados obtidos a partir da simulação mostram que o controlador Fuzzy pode melhorar a eficiência global do sistema e minimizar perdas de energia quando a mudança de irradiação é frequente. O método *Perturb and Observe* por I_{Lref} apresentou resultados satisfatórios e são adequados para sistemas onde a variação de G_a e T_a não acontecem de forma abrupta (Apêndice D) e onde a alta qualidade de energia não é requerida.

O método Fuzzy por inferência de corrente PV depende de curvas características conhecidas. Para que o mesmo controle opere com curvas diferentes é necessário inseri-las no modelo. No entanto, não existe um método que possa mesclar curvas características de fabricantes diferentes. Desta forma, para cada tipo de módulo PV, o modelo precisará ser readaptado com base nas suas curvas características. Como em qualquer método de inferência, é possível melhorar ainda mais o desempenho em alguns intervalos de tempo ajustando os parâmetros deste controlador. Por outro lado, o método Fuzzy que usa a variação

do *duty cycle* como variável de controle tem suas entradas e saídas normalizadas. Este aspecto possibilita adaptar este controle a outros sistemas que usam o mesmo princípio de controle, como é o caso dos aerogeradores, que tem uma curva característica cujo perfil é semelhante ao do painel solar. Este modelo demonstrou ser mais eficiente e adequado para rastrear o ponto máximo de potência, mesmo quando há expansão do arranjo PV usando o mesmo tipo de módulos, ou substituindo-os por módulos de outros fabricantes com outras faixas de potência, sem precisar de quaisquer ajustes no modelo. Na prática podem ser necessários pequenos ajustes com finalidade de respeitar a dinâmica de resposta de um determinado tipo de painel. Este controlador ainda tem a vantagem de não fazer uso de um PI como os demais casos apresentados, eliminando erros no rastreamento causados por um ajuste ineficiente do PI.

Foi possível apresentar um sistema de energia fotovoltaico isolado, baseado em conversor *multi-string*, com armazenamento através de um banco de baterias e cargas resistivas trifásicas. A este sistema foi aplicado o controlador Fuzzy por dP/dI com saída $dD(k)$ para realizar o MPPT, o que apresentou resultados satisfatórios.

Pela análise das correntes *RMS* e da potência VA no conversor *Boost* verificou-se que o método MPPT Fuzzy por dP/dI com saída $dD(k)$ apresentou melhor desempenho.

De forma geral, a análise aqui apresentada mostrou que a operação em torno do MPPT sem demasiada flutuação irá reduzir o *ripple* nos terminais do módulo PV bem como nos outros dispositivos do circuito. A escolha do algoritmo de controle de MPPT pode influenciar na especificação dos componentes do sistema.

5.2 Trabalhos Futuros

A escolha da frequência de chaveamento, o tempo de computação e a tolerância a dados imprecisos são muito importantes serem abordados para uma futura implementação prática baseada em microcontroladores ou processadores digitais de sinais. Desta forma sugere-se:

Realizar a montagem do projeto para uma pequena potência e obter resultados experimentais para comparar com os resultados de simulação obtidos neste trabalho com a finalidade de validar esses resultados;

Desenvolver um estudo do sistema *multi-string* apresentado, em operação interligada ao sistema elétrico de geração;

Efetuar um estudo econômico para implantação deste sistema para avaliar o melhor custo benefício de cada método MPPT simulado;

Adicionar novas fontes de energia ao elo CC através de conversores eletrônicos a fim de construir sistemas híbridos de energia;

Desenvolver um controle geral para todo o sistema *multi-string* para realizar o controle do fluxo de energia entre os diferentes conversores.

REFERÊNCIAS

- ALTAS, I. H.; SHARAF, A. M. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. *ICCEP '07. International Conference on Clean Electrical Power*, 2007, Capri, p. 341-345, 21-23 May 2007.
- ANDOUISI, R.; MAMI, A.; DAUPHIN-TANGUY, G.; ANNABI, M. Bond Graph Modeling And Dynamic Study of a Photovoltaic System Using MPPT Buck-Boost Converter. *2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v. 3, p. 6, 6-9 Oct. 2002.
- 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.
- ARUMUGHAN, J.; KOPECEK, R.; PERNAU, T.; BUCK, T.; FATH, P.; PETER, K. Realization Of Thin Mc-Silicon Pert-Type Bifacial Solar Cells In Industrial Environments. *Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, v. 1, p. 1103 – 1106, May 2006.
- AZAB, Mohamed. Improved Circuit Model of Photovoltaic Array. *World Academy Of Science, Engineering and Technology*, v. 34, p. 571-574, October 2008.
- BLAABJERG, F.; ZHE CHEN; KJAER, S. B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 5, p. 1184 – 1194, Sept. 2004.
- BORBA, Aroldo José Viana. *Conversor para Acoplamento de Sistemas Fotovoltaicos à Rede Trifásica*. 1995. 135 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 1995.
- BP Solar USA. How solar works [homepage na Internet]. Frederick: BP Solar © 1996-2009 BP p.l.c; acesso em 22 de Janeiro de 2008. Disponível em: <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9019569&contentId=7035645>.
- BULL, S. R. Renewable Energy Today and Tomorrow. *Proceedings of the IEEE Renewable Energy Lab., Golden, CO*, v. 89, n. 8, p. 1216 – 1226, Aug. 2001.

- CAMPBELL, R.C. A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies. *NAPS '07, 39th North American Power Symposium, 2007*, Las Cruces, N M, p. 97 – 101, 30 Sept. 2007-2 Oct. 2007.
- CARRASCO, J. M.; FRANQUELO, L. G.; BIALASIEWICZ, J. T.; GALVAN, E.; GUISSADO, R. C. P.; PRATS, Ma. A. M.; LEON, J. I.; MORENO-ALFONSO, N.; Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 4, p. 1002 – 1016, June 2006.
- CONTINO, R.; IANNONE, F.; LEVA, S.; ZANINELLI, D. Hybrid photovoltaic-fuel cell system controller sizing and dynamic performance evaluation. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006. Montreal, Que, p. 6, 2006.
- COX, Earl. *The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems*, 1. ed. Ed. Ap Professional; Book&Disk edition, February 1994. 1994. 512 p.
- DARLA, R. B. Development of Maximum Power Point Tracker for PV Panels Using SEPIC Converter. *INTELEC 2007. 29th International Telecommunications Energy Conference, 2007*, p. 650 – 655, 30 Sept. 2007 - 4 Oct. 2007.
- DEL CANIZO, C.; MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; TOBIAS, I.; LUQUE, A. Analysis of a Technology for CZ Bifacial Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 48, n. 10, p. 2337 – 2341, Oct 2001.
- DHERE, N.; CRUZ, L. R.; LOBO, P. C.; BRANCO, J. R. T.; RUTHER, R.; ZANESCO, I.; LIMA, J. H. G. History of Solar Energy Research in Brazil. *ISES 2005 Solar World Congress, 2005, Orlando - EUA. Proceedings of the 2005 Solar World Congress*, Freiburg - Alemanha: International Solar Energy Society, 2005. p. 614-619. 2005.
- DIAZ-ESCOBAR, E.; OLAVARRIETA, L.D. Tlahuilli-ce: a novel solar energy program for the design of photovoltaic systems. *CONIELECOMP 2004. 14th International Conference on Electronics, Communications and Computers. 2004*, p. 75-80, 16-18 Feb. 2004.
- D'SOUZA, N. S.; LOPES, L. A. C.; XUEJUN LIU. An Intelligent Maximum Power Point Tracker Using Peak Current Control. *PESC '05. IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005*, Recife, p. 172-, 16-16 June 2005.
- EL-AAL, Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd. *Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System*. Dissertation Day: 15/04/2005. 166 f. Dissertação (Doctor in Engineering, Dr.-Ing) – Faculty of Electrical Engineering University of Kassel. Kassel, Germany, 2005.

- ELECTRA, Empresa de Electricidade e Água, S.A. *Relatório de contas de 2008*. Acesso em: junho de 2008. Disponível em: http://www.electra.cv/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=11&&Itemid=121. Abril de 2009.
- ELGENDY, M. A.; ZAHAWI, B.; ATKINSON, D. J.; Analysis of the performance of DC photovoltaic pumping systems with maximum power point tracking. *PEMD 2008. 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008*, Youk, p. 426-430, 2-4 April 2008.
- EL-SHATER, T. F. Fuzzy Controller Based for Photovoltaic Maximum Power Tracking. *IECEC, 02, 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 2002*, p. 239 – 241, 29-31 July 2004.
- ESTEFEN, Segen F. As Múltiplas Ofertas do Mar. *Scientific American Brasil*, Edição Especial, n. 32, p. 76-81, 2009.
- FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. MPPT Techniques for PV Systems: energetic and cost comparison. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, p. 1-6, 20-24 July 2008.
- FEMIA, Nicola; PETRONE, Giovanni; SPAGNUOLO, Giovanni; VITELLI, Massimo. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 20, n. 4, p. 963 - 973, July 2005.
- FIRST SOLAR, INC. *First Solar Passes \$1 Per Watt Industry Milestone; Company Cuts Manufacturing Cost to 98 Cents Per Watt in Fourth Quarter*. First Solar, Inc. (Nasdaq: FSLR). <http://investor.firstsolar.com/phoenix.zhtml?c=201491&p=irol-newsArticle&ID=1259614&highlight=.> Fevereiro.24,2009. News Release.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. *World Record: 41.1% efficiency reached for multi-junction solar cells at Fraunhofer ISE*. Alemanha. Disponível em: <http://www.ise.fraunhofer.de/press-and-media/pdfs-zu-presseinfos-englisch/2009/press-release-world-record-41.1-efficiency-reached-for-multi-junction-solar-cells-at-fraunhofer-ise-pdf-file>. Freiburg, January 2009. Press Release.
- 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. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100046&lng=en&nrm=abn. Acesso em 16 /10/ 2008.

- GLASNER, I.; APPELBAUM, J. Advantage of Boost Vs. Buck Topology For Maximum Power Point Tracker In Photovoltaic Systems. *Nineteenth Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 1996, p. 355 – 358, 5-6 Nov 1996.
- GOMARIZ, S.; BIEL, D.; MARTINEZ, L.; GUINJOAN, F.; MORENO, J. M.; Simple fuzzy controller for a buck converter, comparison with maximum current control technique. *IECON 97. 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1997, New Orleans, LA, USA, v. 2, p. 765-769, 9-14 Nov 1997.
- GOUNDEN, N. Ammasai; PETER, Sabitha Ann; NALLANDULA, Himaja; KRITHIGA, S. Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renewable energy*, v. 34, n. 3, p. 909-915 7, March 2009.
- GREENWOOD, Chris; HOHLER, Alice; HUNT, George; LIEBREICH, Michael; SONNTAG-O'BRIEN, Virginia; USHER, Eric. *Global Trends in Sustainable Energy Investment 2007: Analysis of Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy and Energy Efficiency in OECD and Developing Countries*, United Nations Environment Programme – UNEP, 2007, p. 3, Relatório técnico.
- GWON-JONG YU; MYUNG-WOONG JUNG; JINSOO SONG; IN-SU CHA; IN-HO HWANG. Maximum power point tracking with temperature compensation of photovoltaic for air conditioning system with fuzzy controller. *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1996, Washington, DC, USA, p. 1429-1432, 13-17 May 1996.
- HAUSCHILD, Luciano. *Avaliação de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel*. 2006. 117f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- HE WANG; HONG YANG; HONGCAI WU; GUOMING WU. A Modified Model For Large Grain Multicrystalline Silicon Used For Solar Cells. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005, p. 1141- 1144, 3-7 Jan. 2005.
- IMHOFF, J.; PINHEIRO, J. R.; HEY, H. L. A Stand-Alone Photovoltaic System Based on DC-DC Converters in a Multi-String Configuration. *EPE 2007 - 12th European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, v. 1, p. 10-11. 2007.
- JAIN, R.K. Suitability of InP Window Layers For InGaAs Solar Cells. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2003*, v. 1, p. 75- 78, 11-18 May 2003.
- JEONG CHUL LEE; SANG WON JUN; JAE HO YUN; SEOK KI KIM; JINSOO SONG; KYUNG HOON YOON. Si-based thin-film solar cells: process and device performance

analysis. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2005*, p. 1552 - 1555, 3-7 Jan. 2005.

KHAEHINTUNG, N.; PRAMOTUNG, K.; SIRISUK, P. Risc microcontroller built-in fuzzy logic controller for maximum power point tracking in solar-powered for battery charger. *TENCON 2004. IEEE Region 10 Conference*, v. 4, p. 637 – 640, 21-24 Nov. 2004.

KHAEHINTUNG, N.; PRAMOTUNG, K.; TUVIRAT, B.; SIRISUK, P. RISC-microcontroller built-in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered light-flasher applications. *IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004*, v. 3, p. 2673-2678, 2-6 Nov. 2004.

KHAEHINTUNG, N.; SIRISUK, P. Application of Maximum Power Point Tracker with Self-organizing Fuzzy Logic Controller for Solar-powered Traffic Lights. *PEDS '07. 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007*, p. 642 – 646, 27-30 Nov. 2007.

KHAEHINTUNG, N.; SIRISUK, P. Implementation of maximum power point tracking using fuzzy logic controller for solar-powered light-flasher applications. *MWSCAS '04. The 2004 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2004*, v. 3, p. iii-171-4, 25-28 July 2004.

KHAEHINTUNG, N.; SIRISUK, P.; KUNAKORN, A. Grid-connected Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking using Self-Organizing Fuzzy Logic Controller. *TENCON 2005, IEEE Region 10*, Melbourne, Qld, p. 1-4, 21-24 Nov. 2005.

KIM, Seul-Ki; JEON, Jin-Hong; CHO, Chang-Hee; AHN, Jong-Bo; KWON, Sae-Hyuk. Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 4, p. 1677-1688, April 2008.

KJAER, S.B.; PEDERSEN, J.K.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, p. 1292 – 1306, Sept.-October 2005.

KLIR, George J.; BO YUAN. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*, 1. ed. May 21, 1995. Ed. Prentice Hall PTR, 1995. 592 p.

KLIR, George J.; FOLGER, Tina A. *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*. 1. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Ed. Prentice Hall International, 1988. 368 p.

KOLHE, M.; JOSHI, J. C.; KOTHARI, D. P. Performance Analysis of a Directly Couple Photovoltaic Water-Pumping System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 19, n. 3, p. 613-618, Sept. 2004.

- 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.
- 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 networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 3, p. 793 – 803, 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.
- KUANG-YOW LIAN; YA-LUN OUYANG; WEI-LUN WU. Realization of maximum power tracking approach for photovoltaic array systems based on T-S fuzzy method. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2008. FUZZ-IEEE 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, Hong Kong, p. 1874-1879, 1-6 June 2008.
- LITTLE, M. THOMSON, M. INFELD, D. Power converters for use in stand-alone renewable energy systems incorporating hydrogen storage. *UPEC 2004 - 39th International Universities Power Engineering Conference*, 2004, v. 2, p. 644- 648, 6-8 Sept 2004.
- LOPEZ, M.; MORALES, D.; VANNIER, J. C.; SADARNAC, D. Influence of Power Converter Losses Evaluation in the Sizing of a Hybrid Renewable Energy System. *International Conference on Clean Electrical Power*, 2007, p. 249-254, May 2007
- LORENZO, E.; ARAUJO, G.; CUEVAS, A.; EGIDO, M.; MINANO, J.; ZILLES, R. *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. 1. ed. Sevilla: Institute. of Solar Energy, Polytechnic Univ. of Madrid, 1994. Ed. Earthscan Publications Ltd, January 1994, 340 p.
- LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. 1. ed. Chichester – England. 2003. Ed. John Wiley and Sons, 2003. April 2003. 1168 p.
- MAHMOUD, A. M. A.; MASHALY, H. M.; KANDIL, S. A.; EL KHASHAB, H.; NASHED, M. N. F. Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking. *IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2000, Nagoya, Japan, v. 1, p. 735-740, 2000.
- MASHALY, H. M.; SHARAF, A. M.; MANSOUR, M.M.; EL-SATTAR, A. A. Fuzzy logic controller for maximum power tracking inline-commutated photovoltaic inverter scheme. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1993, Vancouver, BC, Canada, v. 2, p. 1287-1290, 14-17, Sep 1993.

- MBOGHO, M. S.; WEKESA, C.; MURAGE, D.; TOYODA, J. Economic analysis of supplying an electro village using alternative electrical power sources. *AFRICON, 1996, IEEE AFRICON 4th*, v. 2, p. 968 - 971, 24-27 Sep 1996.
- MEINHARDT M.; CRAMER, G. Past, present and future of grid connected photovoltaic- and hybrid-power-systems. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 2, p. 1283 – 1288, 16-20 July 2000.
- MENDEL, J. M. Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial. *Proc. IEEE*, v. 83, n. 3, p. 345-377, 1995.
- MICHAEL, S.; UTSLER, J. The Use of Genetic Algorithm for the Design and Optimization of Advanced Multi-Junction Solar Cells. *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2005*, v. 1, p. 163 – 166, 7-10 Aug. 2005.
- MOHAN, Ned.; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3. ed. Ed. John Wiley & Sons; 10 Oct., 2002. 824 p.
- MYRZIK, J. M. A. CALAIS, M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - a review. *2003 IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna* v. 2, p. 8, 23-26 Junho de 2003.
- NEVES, José Maria – Primeiro Ministro de Cabo Verde. *Uma Nação confiante no futuro*. 01/08/2008. <http://www.embcv.org.br/portal/modules/news/article.php?storyid=242> [site oficial do governo de Cabo Verde]. Artigo em site.
- NGWE SOE ZIN; BLAKERS; ANDREW FRANKLIN; EVAN EVERETT; VERNIE. Design, Characterization and Fabrication of Silicon Solar Cells for >50% Efficient 6-junction Tandem Solar Cells. *PVSC '08. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008*. San Diego, CA, USA, p. 1-4, 11-16 May 2008.
- PARK, Joung-Hu; AHN, Jun-Youn; CHO, Bo-Hyung; YU, Gwon-Jong. Dual-Module-Based Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 4, p. 1036 - 1047, August 2006.
- PATCHARAPRAKITI, N. PREMRUDEEPREECHACHARN, S. Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002, v. 1, p. 372-377, 2002.
- PEDRYCZ, Witold; GOMIDE, Fernando. *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*. 1. ed. Massachusets: Ed. MIT Press, 1998. 465 p.
- PONCE-ALCANTARA, S. DEL CANIZO, C. LUQUE, A. PERC structure to improve multicrystalline solar cell performance. *2005 Spanish Conference on Electron Devices, Tarragona*, p. 283-286, 2-4 Feb. 2005.

- RASHID, Muhammad H. *Power Electronics Circuits, Devices and Applications*. 3. ed. University of Florida: Ed. Prentice Hall. August 2003. 912 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.
- REIS, Luiz Octávio Mattos dos. *Lógica Fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás*. 2002. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). *Renewables Global Status Report 2007*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). Paris, Fevereiro 2008. 54p. Disponível em http://www.ren21.net/pdf/RE2007_Global_Status_Report.pdf. Relatório Técnico.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). *Renewables Global Status Report: 2009 Update*. Paris, 13 May 2009. 32 p. Relatório Técnico.
- RIMING SHAO; LIUCHEN CHANG. Evaluating Mppt Converter Topologies Using a Matlab PV Model. *CCECE 2008 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008*, p. 000619 – 000622, 4-7 May 2008.
- ROEDERN, B. V. *Best Production-Line PV Module Efficiency Values*. National Renewable Energy Laboratory. Março de 2009.
- SOILEAU, R.D. A diagnostic testing program for large lead acid storage battery banks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 30, n. 1, p. 193-200, Jan/Feb 1994.
- SONI, A. OZVEREN, C. S. Improved Control of Isolated Power System by the Use of Feeding Technique. *UPEC 06 - Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, 2006*, Newcastle-upon-Tyne, v. 3, p. 974-977, 6-8 Sept. 2006.
- 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.
- STOTT, P.A.; MUELLER, M.A.; COLLI, V.D.; MARIGNETTI, F.; DI STEFANO, R. DC Link Voltage Stabilisation in Hybrid Renewable Diesel Systems. *International Conference on Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07*, Capri, p. 20 – 25, Mai 2007.
- TAHERBANEH, M.; MENHAJ, M.B. A Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracker for Body Mounted Solar Panels in LEO Satellites. *ICPS 2007. IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007*, p. 1 – 6, 6-11 May 2007.

- TAN, Chee Wei; GREEN, T. C.; CARLOS A. HERNANDEZ-ARAMBURO. An Improved Maximum Power Point Tracking Algorithm with Current-Mode Control for Photovoltaic Applications. *PEDS 2005. International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005*, Kuala Lumpur, v. 1, p. 489-494, 2005.
- TIRUMALA, R. IMBERTSON, P. MOHAN, N. HENZE, C. BONN, R. An efficient, low cost DC-AC inverter for photovoltaic systems with increased reliability. *IECON 02-IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, v. 2, p. 1095 – 1100, 5-8 Nov. 2002.
- TSAI-FU WU; CHIEN-HSUAN CHANG; YU-HAI CHEN. A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 47, n. 2, p. 1685 – 1692, Apr 2000.
- TSE, K. K.; HO, B. M. T.; SHU-HUNG; CHUNG, H; RON HUI, S. Y. Comparative Study of Maximum-Power-Point Trackers for Photovoltaic Panels Using Switching-Frequency Modulation Scheme. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, v. 51, n. 2, p. 410-418, April 2004.
- VALE, S. B. do, BEZERRA, U. H., PINHO, J. T. e PEREIRA, E. J. da S. Estudo da Inserção de Célula a Combustível Integrada a Sistema Híbrido de Geração de Eletricidade Isolado. 2º *WICaC - Workshop Internacional de Células a Combustível*, Unicamp - Campinas, Outubro. 2004.
- VEERACHARY, Mummadi.; SENJYU, Tomonobu.; UEZATO, Katsumi. Feedforward maximum power point tracking of PV systems using fuzzy controller. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 38, n. 3, p. 969 – 981, Jul 2002.
- Wikipédia. Solar cell [homepage na Internet]. Wikipedia Foundation, Inc., a U.S. registered; [atualizada em 13 de Maio de 2009] acesso em 12 de Junho de 2008. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell.
- WOLFS, P.; QUAN LI. A Current-Sensor-Free Incremental Conductance Single Cell MPPT for High Performance Vehicle Solar Arrays. *PESC '06. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006*, Jeju, p. 1-7, 18-22 June 2006.
- WRONSKI, C. R.; PEARCE, J. M. R.; KOVAL, J.; FERLAUTO, A. S.; COLLINS, R. W. Progress In Amorphous Silicon Based Solar Cell Technology. *RIO 02 - World Climate & Energy Event*, p. 67-72, 6-11 January 2002.
- WYRSCH, N. DOMINE, D. FREITAS, F. FEITKNECHT, L. BAILAT, J. BALLIF, C. POE, G. BATES, K. REED, K. Ultra-Light Amorphous Silicon Cell For Space Applications.

Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, HI, v. 2, p. 1785-1788, May 2006.

XIAO-BO LI, KE DONG, HAO WU. Study on the intelligent fuzzy control method for MPPT in Photovoltaic Voltage Grid System. *ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2008, Singapore, p. 708-711, 3-5 June 2008.

YANG CHEN; SMEDLEY, Keyue Ma. A cost-effective single-stage inverter with maximum power point tracking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 5, p. 1289 – 1294, Sept. 2004

ALTAS, I. H.; SHARAF, A. M. A novel method of fuzzy controlled maximum power point tracking in photovoltaic systems. *Renewable Energy*, v. 33, n. 3, p. 388-399, March 2008.

YI-HWA LIU; RONG-CENG LEOU; JENG-SHIUNG CHENG. Design and Implementation of a Maximum Power Point Tracking Battery Charging System For Photovoltaic Applications. *IEEE Power Tech*, 2005, Russia, p.1 – 5, 27-30 June 2005.

YU-KANG LO; TING-PENG LEE; KUAN-HUNG WU. Grid-Connected Photovoltaic System With Power Factor Correction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 5, p. 2224 - 2227, May 2008.

YUSOF, Y.; SAYUTI, S. H.; ABDUL LATIF, M.; WANIK, M. Z. C. Modeling and Simulation of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System. *PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference*, 2004, p. 88-93, 29-30 Nov. 2004.

ZADEH, Loft A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 28, n. 1, pp 28-44, 1978.

ZIMMERMANN, Hans-Jürgen. *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 4. ed. Norwell, Massachusetts, MA: Ed. Kluwer Academic Publishers, 2001. 514 p.

APÊNDICE A – Circuito Equivalente de uma Célula Solar para o *Simulink*

Na Seção 2.3 é apresentado a modelagem matemática de uma célula solar considerando o circuito equivalente da Figura 4 que mostra o resultado da aplicação das equações matemáticas do modelo no *Simulink*. A Figura 52 apresenta os detalhes internos do circuito equivalente da célula solar (área hachurada da Figura 9).

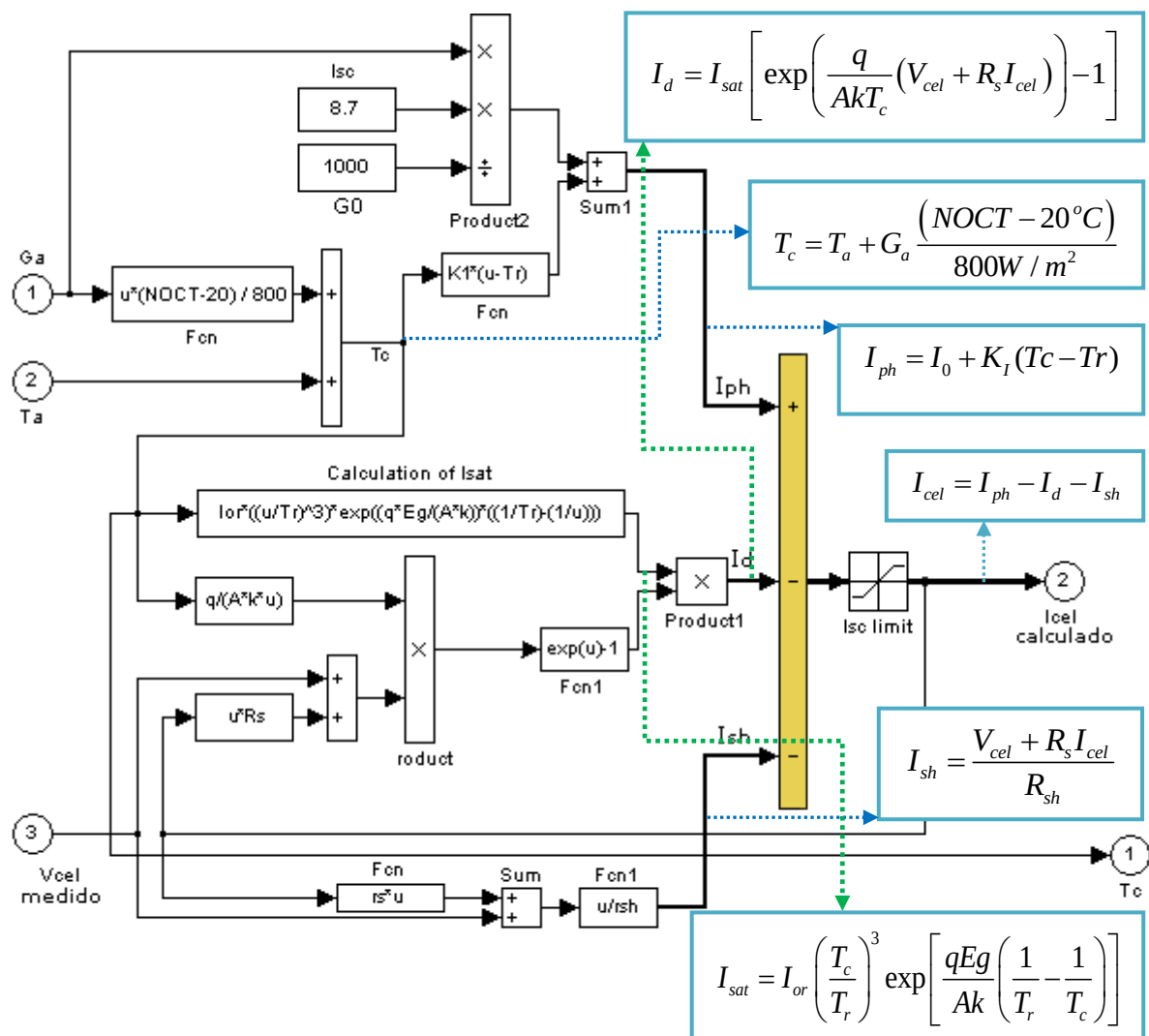


Figura 52 - Circuito equivalente da célula solar para Matlab/Simulink.

APÊNDICE B – Ajuste do modelo do painel para representar módulos comerciais

O MODELO do painel para Matlab/Simulink inclui alguns parâmetros fixos que são válidos para qualquer tipo de célula solar. No entanto, a maioria dos parâmetros utilizados na modelagem varia de acordo com o material e a tecnologia de fabricação da célula, definidos pelo fabricante. Como não existe uma correlação direta entre a os dados disponíveis nos *data-sheets* dos módulos comerciais e os dados necessários para sua representação no modelo Simulink, será apresentado um exemplo de ajuste dos parâmetros do modelo PV a partir do módulo KC130TM do fabricante Kyocera. A Tabela 6 apresenta algumas características elétricas deste módulo.

Tabela 6: Características elétricas do módulo KC130TM - Kyocera

Electrical Performance under Standard Test Conditions ¹ STC	
Maximum power - P _{max}	130 W (+10% / -5%)
Maximum power voltage - V _{mpp}	17.6 V
Maximum power current - I _{mpp}	7.39 A
Open circuit voltage - V _{oc}	21.7 V
Short circuit current - I _{sc}	8.02 A
Max system voltage	600V
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM 1.5	
Maximum power - P _{max}	92 W
Maximum power voltage - V _{mpp}	15.5 V
Maximum power current - I _{mpp}	5.94 A
Open circuit voltage - V _{oc}	19.9 V
Short circuit current - I _{sc}	6.47 A
Mechanical Characteristics	
No of cells	36 Cells

Além dos parâmetros fixos incluídos na modelagem, para que o modelo PV possa representar qualquer painel desejado são necessários os seguintes parâmetros: número de células em série (N_s), número de células em paralelo (N_p), *Normal Operating Cell Temperature* (NOCT), corrente de curto circuito (I_{sc}), Temperatura de I_{sc} (K_I), disponíveis na Tabela 3 e no *data-sheet* do Anexo 3, e ainda, a média da temperatura de referência da célula

(T_r), constante de idealização ou emissividade (A), *Gap Energy* em eV (E_g), corrente de saturação do diodo em T_r (I_{or}), resistência série (R_s) e resistência paralelo (R_{sh}).

Para simular o módulo KC130TM foi considerada uma média da temperatura de referência da célula de 298K. A constante de idealização A que é o fator que indica o quão perto as células se encontram uma da outra é de 1,3 para este módulo (silício multicristalino de alta eficiência). A Tabela 7 apresentada em (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) indica alguns valores típicos do fator A de acordo com a tecnologia da célula.

Tabela 7: Dependência do fator A de acordo com a tecnologia da célula

Tecnologia	A
Si-mono	1,2
Si-multi	1,3
a-Si:H	1,8
a-Si:H tandem	3,3
a-Si:H triplo	5
CdTe	1,5
CIS	1,5
AsGa	1,3

Ainda segundo (KOTTAS, BOUTALIS, KARLIS, 2006) o *Bandgap Energy* é de 1,115 eV para semicondutores (principalmente o Si) utilizados na fabricação de células solares. Em (PARK *et al.*, 2006) foi utilizada uma corrente de saturação do diodo em T_r (I_{or}) de 10^{-10} . Neste Trabalho foi usado 3.047×10^{-7} , valor obtido por um procedimento heurístico, utilizando-se aproximações sucessivas, assim como os valores da resistência série (R_s) e da resistência paralelo (R_{sh}) que influenciam no comportamento da curva característica do painel solar conforme é descrito na Seção 2.6.2.

Na Figura 53 e 54 pode-se verificar que os valores de potência máxima (P_{max}), tensão na potência máxima (V_{mpp}), corrente na potência máxima (I_{mpp}) e tensão em circuito aberto (V_{oc}) estão de acordo com a Tabela 3 fornecida pelo fabricante. Observe-se que esses parâmetros não são fornecidos na modelagem, mas o modelo é capaz de estimar com boa aproximação todas essas variáveis de interesse.

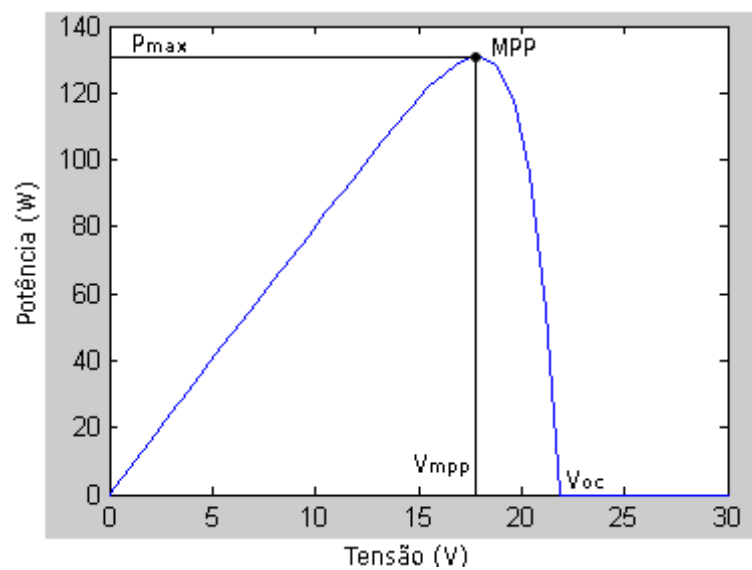


Figura 53 – Resultado de simulação da curva de potência do painel KC130T da Kyocera.

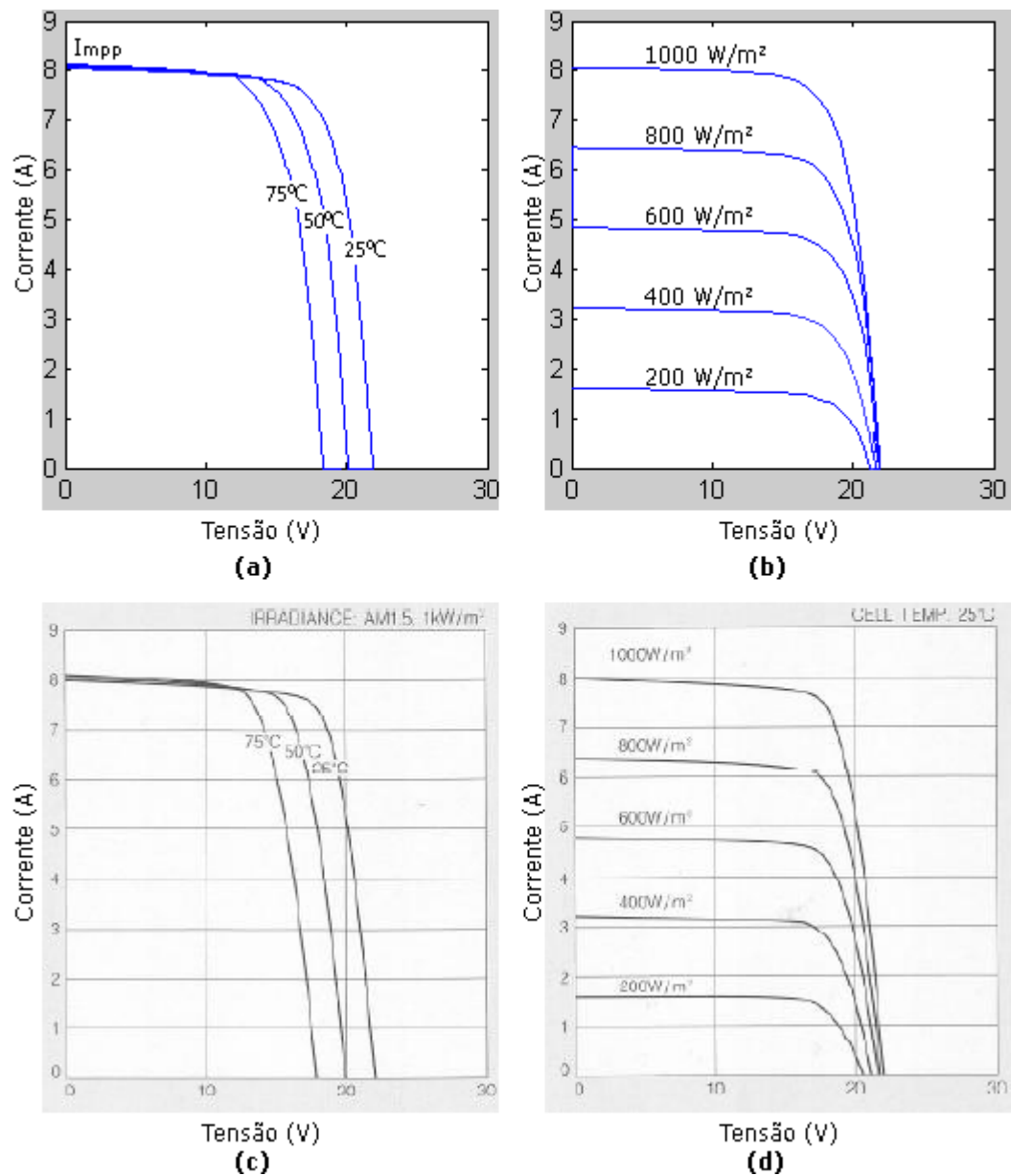


Figura 54 – Simulação da curvas características do painel fotovoltaico KC130T do fabricante Kyocera. (a) e (b) modelo simulado; (c) e (d) curvas características do *data-sheet* do Anexo3.

APÊNDICE C – Defuzzificação pelo Método do Centróide

A ENTRADA para o processo defuzzificação é um conjunto Fuzzy e a saída é um número real. No entanto, o agregado de um conjunto fuzzy engloba uma gama de valores de saída, e assim deve ser defuzzificada, a fim de resolver um único valor de saída do conjunto. A defuzzificação pelo método do centróide é efetuado pela equação abaixo.

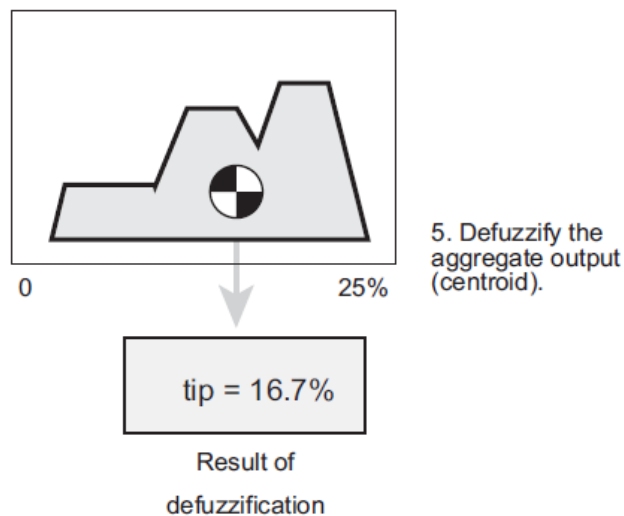
$$C_A = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_o(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_o(u_i)} \quad (39)$$

Onde,

$\mu_o(u_i)$ é a área de uma função de pertinência modificada pelo processo de inferência Fuzzy,

u_i é a posição do centróide da função de pertinência individual.

O método centróide retorna ao centro da área sob a curva.



APÊNDICE D – MPPT pelo método *P&O* com variação não abrupta de G_a e T_a .

OS resultados obtidos nas simulações apontaram que o método *Perturb and Observe* (tanto a que usa a corrente PV como a que usa a corrente do indutor do *Boost* como referência de controle) apresenta um desempenho inferior aos métodos baseados em lógica Fuzzy apresentados no presente trabalho quanto à velocidade de rastreamento sob rápidas variações de irradiação solar G_a , e temperatura ambiente T_a . Nestas condições o algoritmo perde o rastreamento do ponto de máxima potência por alguns instantes. No entanto, quando essas variações acontecem de forma menos abrupta, como ocorre na maioria das vezes, o algoritmo MPPT pelo método *P&O* através de I_{Lref} , apresenta um desempenho satisfatório como mostra a Figura 55.

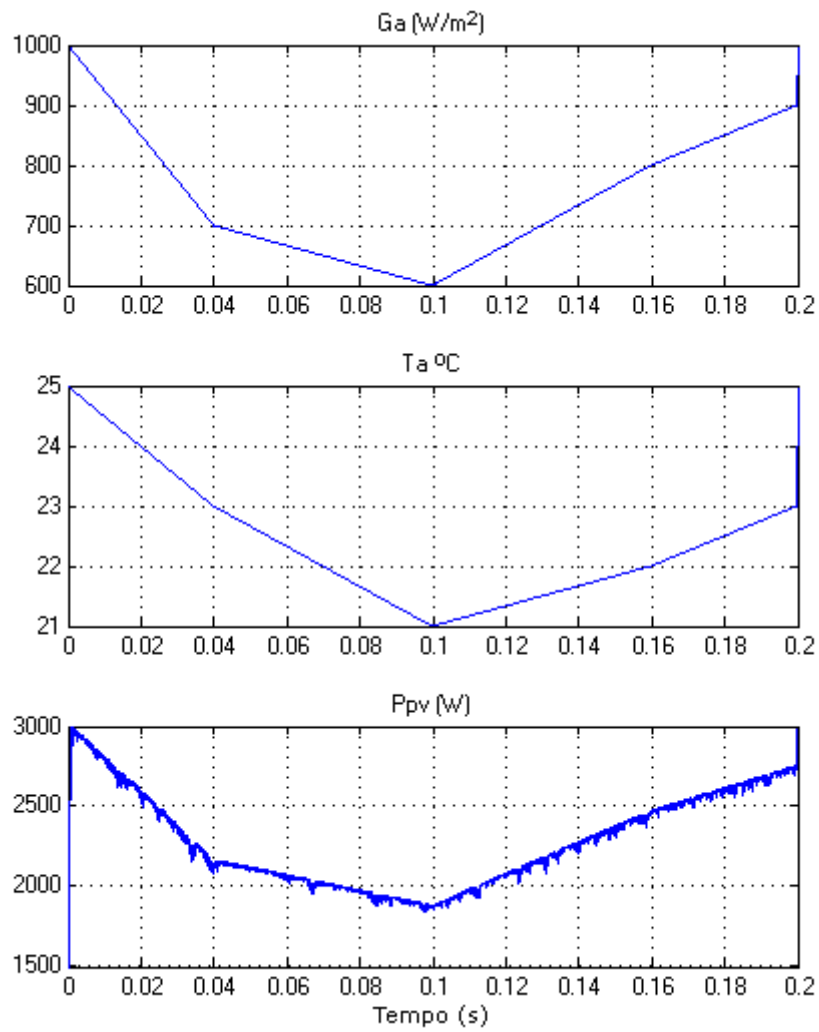


Figura 55: Simulação do MPPT através do método $P\&O$ por I_{Lref} com variação não abrupta de irradiação solar e temperatura ambiente.

APÊNDICE E – Circuito *Matlab/Simulink* para a Configuração *Multi-String*

NA Seção 4.4 considera-se um sistema de energia fotovoltaico isolado baseado no conversor *multi-string* alimentado por dois arranjos fotovoltaicos mostrados no diagrama do circuito da Figura 50. A Figura 56 apresenta o circuito elétrico da Figura 50 para o *Simulink*. Nela podem ser observados todos os componentes discretos do ambiente de simulação *Powergui* projetados para os conversores elevadores (*Boost*), bem como os diodos de bloqueio, filtros, inversor, regulador de tensão da carga, o armazenamento através de um banco de baterias e a carga resistiva trifásica variável.

ANEXO 1 – *Data-sheet* do Painel Solar BPSolar SX3200

O MÓDULO fotovoltaico BPSolar SX3200 é um painel solar multicristalino de alta eficiência (14,2%) de 200W que foi amplamente utilizado neste trabalho. Todos os dados construtivos, características elétricas, e as curvas características encontram-se neste *data-sheet*.


SX 3200

200 watt photovoltaic module

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride multicrystalline silicon cells

Performance

Rated power (P_{max})	200W
Power tolerance	±9%
Nominal voltage	16V
Limited Warranty ¹	25 years

Configuration

B	Bronze frame with output cables and polarized Multicontact (MC) connectors
---	--

Electrical Characteristics²

	SX 3200	SX 3195
Maximum power (P_{max}) ³	200W	195W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	24.5V	24.4
Current at P_{max} (I_{mp})	8.16A	7.96A
Warranted minimum P_{max}	182.0W	177.5W
Short-circuit current (I_{sc})	8.7A	8.6A
Open-circuit voltage (V_{oc})	30.8V	30.7V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(111±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m ² ; wind 1m/s)	47±2°C	
Maximum series fuse rating	15A	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating)	


Mechanical Characteristics

Dimensions	Length: 1680mm (66.14") Width: 837mm (32.95") Depth: 50mm (1.97")
Weight	15.4 kg (33.95 pounds)
Solar Cells	50 cells (156mm x 156mm) in a 5x10 matrix connected in series
Output Cables	RHW-2 AWG# 12 (4mm ²), cable with polarized weatherproof DC rated Multicontact connectors; asymmetrical lengths - 1250mm (-) and 800mm (+)
Diodes	IntegraBus™ technology includes Schottky by-pass diodes integrated into the printed circuit board bus
Construction	Front: High-transmission 3mm (1/8th in) tempered glass; Back: White or BlackTedlar; Encapsulant: EVA
Frame	B Anodized aluminium alloy type 6063T6 Universal frame; Color: bronze

1. Module warranty: 25-year limited warranty of 80% power output; 12-year limited warranty of 90% power output; 5-year limited warranty of material and workmanship. See your local representative for full terms of these warranties.
2. This data represents the performance of typical SX 3200 products, and is based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (STC.)
3. During the stabilization process that occurs during the first few months of deployment, module power may decrease by up to 1% from typical P_{max}

Quality and Safety

ESTI

Module power measurements calibrated to World Radiometric Reference through ESTI (European Solar Test Installation at Ispra, Italy)

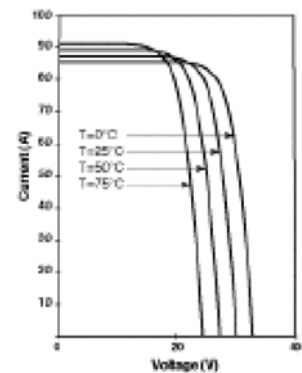


Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating)

Qualification Test Parameters

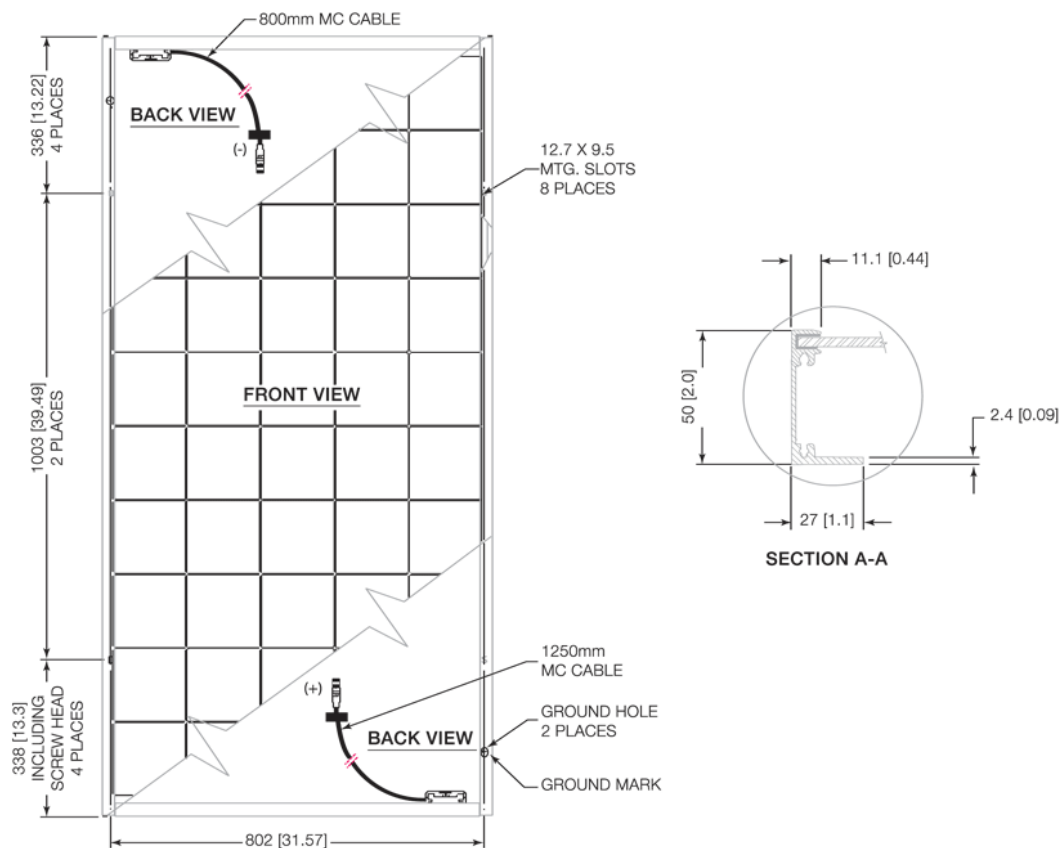
Temperature cycling range	-40°C to +85°C (-40°F to 185°F)
Humidity freeze, damp heat	85% RH
Static load front and back (e.g. wind)	2,400 pa (50psf)
Front loading (e.g. snow)	5,400 pa (113psf)
Hailstone impact	25mm Ø (1 inch) at 23 m/s (52mph)

SX 3200 I-V Curves



Module Diagram

Dimensions in brackets are in inches. Un-bracketed dimensions are in millimeters. Overall tolerances $\pm 3\text{mm}$ (1/8").



Included with each module: self-tapping grounding screw, instruction sheet and warranty documents.

Note: This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject to change without notice.
Additional information may be found on our web site: www.bpsolar.us

ANEXO 2 – *Data-Sheet* da Bateria EPOCH E1-12-40 Fabricado por Valence.

O PRESENTE trabalho utiliza um sistema de armazenamento de energia através de um banco de baterias que foi simulado a partir de baterias de Fosfato de Lítio do tipo EPOCH E1-12-40, fabricado por Valence. Para as simulações foram usados os dados do *data-sheet* deste anexo.

Epoch é uma plataforma de gerenciamento de energia que foi introduzido em 2007. Na prática, é também uma lógica de controle de células permitindo a integração de produtos eletrônicos, *firmware* e *software*, que oferece recursos avançados em soluções de armazenamento de energia. Esta arquitetura de gerenciamento avançado de baterias maximiza a vida útil do módulo e oferece um melhor desempenho nas capacidades de medição e controle, dado que fornece um protocolo de comunicação robusto. É uma tecnologia de baterias altamente configurável que permite a implantação rápida de forma personalizada.

Este trabalho utiliza este tipo de baterias visando-o como melhor alternativa para uma futura implementação prática.



Battery System Family

Lithium Performance & Safety Redefined

Valence Technology's next generation of Lithium Phosphate products are now available. Packaged in standard BCI lead-acid battery sizes, systems are scalable and offer unparalleled flexibility.



Lithium Phosphate delivers twice the run time, at a 35% weight reduction, compared to lead-acid technology. Intelligent interfaces and control electronics make Valence's Epoch products the system of choice in the modern era. Excellent charging and float characteristics coupled with zero maintenance make Epoch an obvious candidate

for EV, PHEV, HEV, Industrial, Marine, UPS, and Military Applications.

Our unsurpassed cycling capability drives a lower Total Cost Of Ownership.

Key Characteristics Include:

- Fail Soft – Built in robustness and redundancy improves system fault tolerance.
- Programmable CAN Bus Communication minimizes host controller integration time.
- Systems configurable to 48 in series and 16 in parallel, with up to 240 batteries per controller
- Each Battery module has built in automatic protection for over-charge, over-discharge, and over-temperature. This protection ensures maximum battery service life.
- Battery level electronic monitoring of SOC, state-of-health, current, voltage, and temperature
- Battery level cell balancing, maximizing deliverable capacity.
- Rugged mechanical design – Dust and Water protection to IP66
- Maintenance-free, Long Cycle Life ~2000, 100% DOD, cycles under normal conditions
- Can be charged using most standard lead-acid chargers (AGM/GEL setting etc.)

Specifications		E1-12-40	E24-12-100	E27-12-122	EEV-19-65
Voltage		12.8V	12.8V	12.8V	19.2V
Capacity (C/5, 23°C)		42 Ah 538 Wh	100 Ah 1280 Wh	122 Ah 1562 Wh	68 Ah 1306 Wh
BCI Group Number		U1R	Group 24	Group 27	NA
Dimensions incl. terminals (L x W x H)		197x132x186mm 7.8x5.2x7.3 in	260x173x232mm 10.3x6.8x9.2 in	306x173x232mm 12.2x6.8x9.2 in	268x148x275mm 10.6x5.8x10.8 in
Terminal bolt		M6 x 1	M8 x 1.25	M8 x 1.25	M8 x 1.25
Weight		7 kg / 15.4 lbs	15.8 kg / 34.8 lbs	18.6 kg / 40.9 lbs	15.6 kg / 34.3 lbs
Standard Discharge @ 23°C	Max Continuous	80A	200A	200A	130A
	Max 30 sec 5% Duty Cycle	120A	300A	300A	200A
	Max 10 sec 5% Duty Cycle	200A	500A	500A	325A
	Cut-off voltage	10 V	10 V	10 V	15 V
Standard Charge @ 23°C	Charge voltage	14.6 V	14.6 V	14.6 V	21.9 V
	Float voltage	13.8 V	13.8 V	13.8 V	20.7 V
	Max continuous	40A	100A	100A	65A
	Max 30 sec 5% Duty Cycle	100A	260A	260A	170A
	Max 10 sec 5% Duty Cycle	140A	350A	350A	225A
Max DCIR @ 23°C, 100% SOC		16mOhm	7mOhm	6mOhm	11mOhm

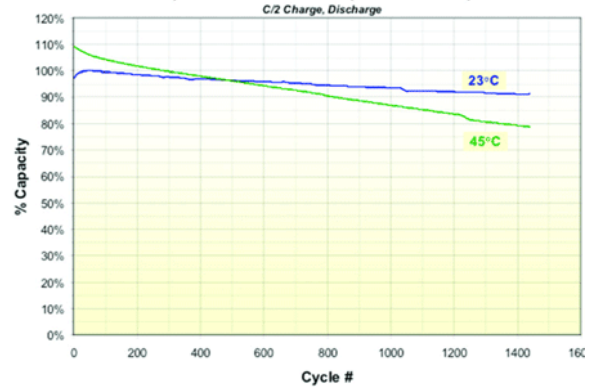
12201 Technology Blvd., Suite 150 • Austin, TX 78727 • USA
 Phone (888) Valence or +1 (512) 527-2900 • Fax +1 (512) 527-2910
 Email: information@valence.com • Web site: www.Valence.com



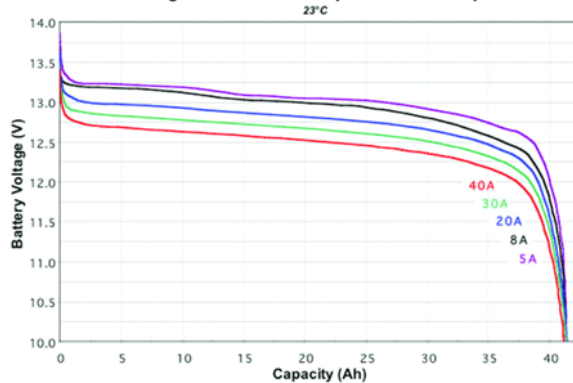
Environmental
Specifications**EPOCH**™

Operational temp range for charge	-10 to +45°C
Operational temp range for discharge	-20 to +50°C
Operating humidity	5% to 95%, non-condensing
Storage temp range	-40°C to +50°C
Shock and vibration	UL 2054
Water and Dust protection	IEC 60529, IP class 66
Certifications	FCC Class B, EN61000-6-2 EN61000-6-4, UL 1642 (cells)
Host interface	CAN 2.0B specifications (ISO 11898-1) Various Analog & Digital configurable outputs
Shipping Classification	UN 3090, Class 9

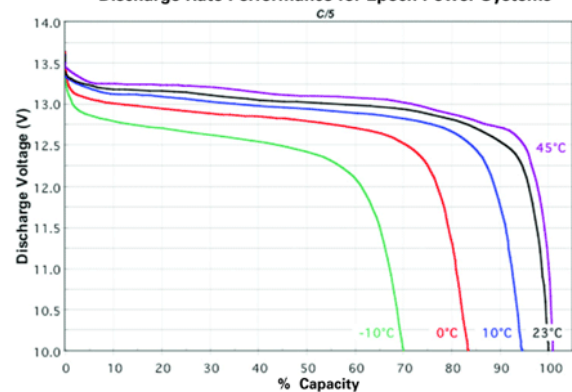
Life Cycle Performance of Epoch Power Systems



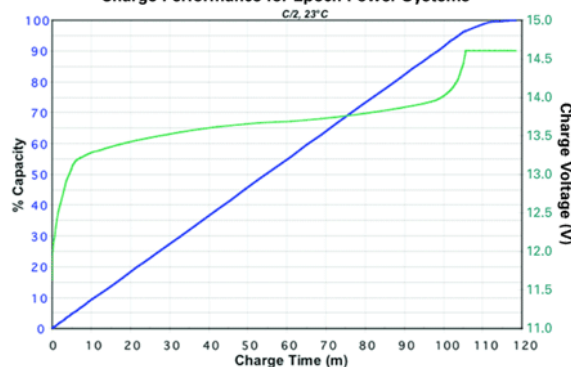
Discharge Performance for Epoch E1 Power System



Discharge Rate Performance for Epoch Power Systems



Charge Performance for Epoch Power Systems



Companion Devices for Epoch Power Systems

EBMU: Battery Management Units that feature battery to battery balance control, direct control capability for up to four contactors, direct data logging, and CAN-Bus communications port to access monitored data.

EBCI: Battery Charge Indicators that feature battery to battery balance control, LED SOC, System Power, Charge/Discharge, and Fault Indications.

* Please refer to separate datasheets on specific Epoch EBMU, EBCI, & Accessories.

Performance may vary depending on, but not limited to battery usage and application. If battery system is used outside specifications, performance will diminish. Epoch® Power System life cycle data based on Valence energy cell performance tests. All specifications are subject to change without notice. All information provided herein is believed, but not guaranteed, to be current and accurate. Copyright © 2008 Valence Technology, Inc. DKR000002X02, February 2008

ANEXO 3 – *Data-sheet* do Painel Solar KC130TM do fabricante Kyocera

O MÓDULO fotovoltaico KC130TM é um painel solar multicristalino de alta eficiência (em torno de 16%) de 130W, fabricado pela Kyocera, que foi utilizado neste trabalho para simular o sistema *multi-string* 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

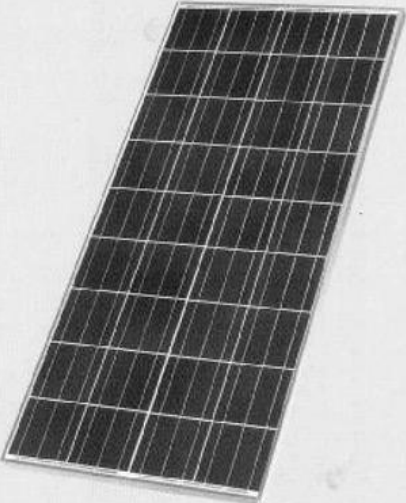
KYOCERA

KC130TM

HIGH EFFICIENCY
MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC
MODULE



MODEL KC130TM



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

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ● 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 | <ul style="list-style-type: none"> ● Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering ● Aviation obstruction lights ● Cathodic protection systems ● Desalination systems ● Railroad signals ● etc. |
|--|---|

QUALIFICATIONS

- | | |
|---|--|
| ■ MODULE
UL1703 certified
Hazardous Locations Class I, Div 2, Groups A, B, C and D | ■ FACTORY
ISO9001 and ISO14001 |
|---|--|

PERFORMANCE WARRANTY

1 year limited warranty on material and workmanship

25 year[™] limited warranty on power output

SPECIFICATIONS

■ Electrical Specifications

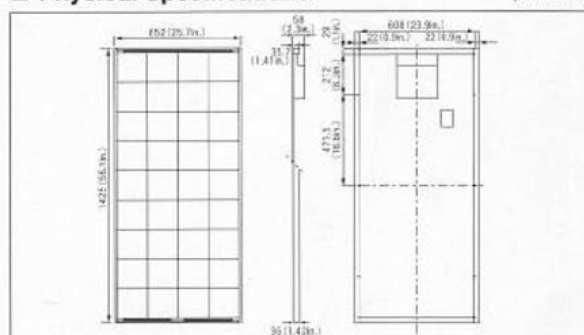
MODEL	KC130TM
Maximum Power	130Watts
Tolerance	+10% / -5%
Maximum Power Voltage	17.6Volts
Maximum Power Current	7.39Amps
Open Circuit Voltage	21.9Volts
Short-Circuit Current	8.02Amps
Length	1425mm (56.1in.)
Width	652mm (25.7in.)
Depth	58mm (2.3in.)
Weight	11.9kg (26.8lbs.)

■ Thermal parameters

Nominal Operating Cell Temperature	47°C
Isc Current temperature coefficient	(3.18 × 10 ⁻³) A/°C
Voc Voltage temperature coefficient	(-8.21 × 10 ⁻²) V/°C

■ Physical Specifications

(Unit: mm)

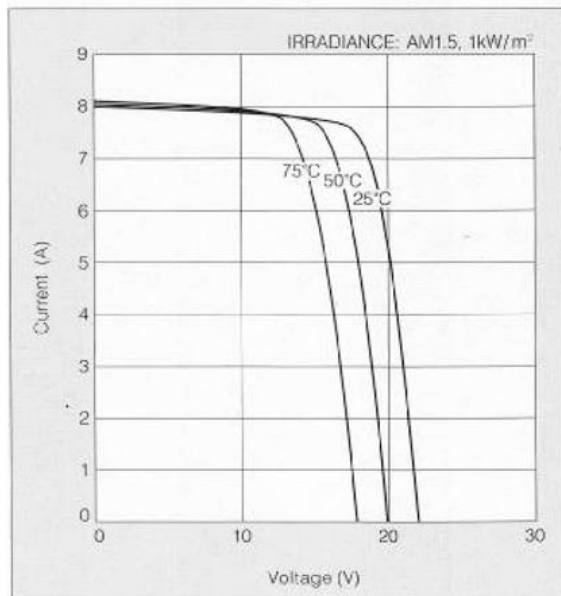


* (Long term output warranty shall guarantee that loss of output is less than 20% of the initial power output within the first 10 years of the initial power output.)

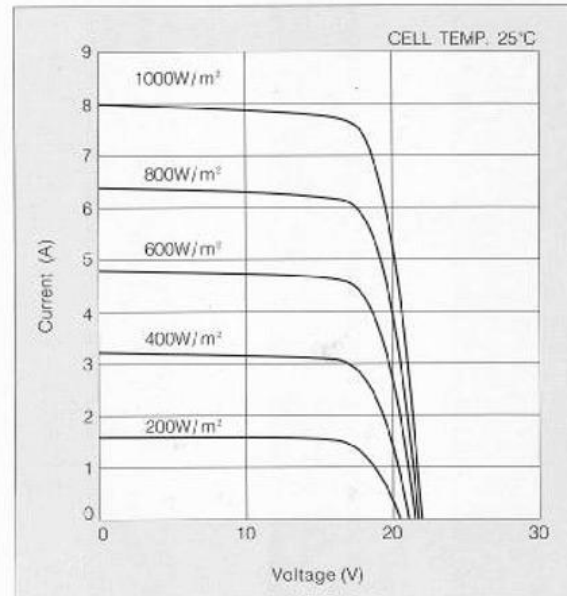
MODEL KC130TM

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130TM at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130TM at various irradiance levels



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

Please contact our office to obtain details without hesitation.



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 Acorn Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL:(1)480-948-6003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431
<http://www.kyocerasolar.com>

● KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Energia Renovavel LTDA,
Rua Maurício da Costa Faria, 85
22780-280, Recreio, 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)2-9886-9588
<http://www.kyocerasolar.com.au/>

● KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz Muller strasse 107, D-73730 Esslingen, Germany
TEL:(49)711-9393417 FAX:(49)711-9393450
<http://www.kyocerasolar.de/>

● KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

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

● KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 803, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsinghai East, Kowloon, Hong Kong
TEL:(852)2-7237183 FAX:(852)2-7244501

● KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 F., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL:(886)2-2555-3509 FAX:(886)2-2559-4131

● KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

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