
Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE
BOMBEAMENTO D'ÁGUA EMPREGANDO
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTÁICA

Autor: Taniel Silva Franklin
Orientadores: Prof. Dr. Jês de Jesus Fiais Cerqueira
Prof. Dr. Eudemario Souza de Santana

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia,
para preenchimento de requisitos parciais à obtenção do
Título de*

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Banca Examinadora

Dr. Jês de Jesus Fiais Cerqueira - **UFBA** (Presidente)
Dr. Eudemario Souza de Santana - **IF-BA**
Dr. Zanoni Dueire Lins - **UFPE**
Dr. Caiuby Alves da Costa - **UFBA**

Salvador-BA, 30 de Abril de 2009.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Resumo

Esta dissertação trata do emprego de sistemas de geração fotovoltaicos como fonte de energia para realização de bombeamento d'água. Esta aplicação tem se destacado por ser economicamente viável em áreas remotas sem rede elétrica convencional, pois compensa o alto investimento inicial com ausência de tarifas durante operação e por ser praticamente livre de manutenção. Para alcançar a alta eficiência de todo sistema é constante a busca por melhorias da eficiência individual de cada dispositivo empregado. Uma das técnicas empregadas para alcançar o ponto de máxima eficiência é através da corrente de curto-circuito dos painéis. O sistema foi simulado no *software* Simulink/Matlab e utilizou um controlador para se encontrar a frequência ótima de operação do motor de indução que aciona a bomba. Neste trabalho foram avaliados dois tipos: o tradicional controlador PI e o controlador nebuloso. Os resultados de simulação apresentados validam a proposta.

Abstract

This master's thesis presents the use of photovoltaic generation systems as energy source in water pumping. This application deserves special attention because it has economical viability at remote areas with no electrical grid. It compensates high initial investments, being virtually maintenance-free and has no tariffs during operation. In order to improve the performance of the whole system it is recommended to search improvements of each device that integrates the system. One of the techniques used to reach the point of maximum efficiency is through the evaluation of the short-circuit current from the panels. The system was simulated at Simulink/Matlab environment. A controller was used to find the optimum operating frequency to drive the induction motor and in this study were analyzed two kinds of controllers: the conventional PI and the fuzzy controller. The results of the simulation has shown the viability of the system proposed.

Agradecimentos

- Ao DEE da UFBA por ter proporcionado a oportunidade de realização do curso de mestrado.
- À **CAPES** pela concessão de uma bolsa de estudos durante a realização do curso.
- Ao Prof. Dr. Jês de Jesus Fiais Cerqueira por ter me aceito como orientando, pela paciência e orientação.
- Ao Prof. Dr. Eudemario Souza de Santana, pelos conhecimentos compartilhados, pelas sugestões e colaborações que auxiliaram tanto na conclusão da dissertação.
- Aos comentários e as sugestões dos membros da banca examinadora desta dissertação:
- Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia pelo conhecimento adquirido durante toda minha formação.
- Aos colegas de laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica Alberto, Armando, Bruno, Tito, Danilo, Venício e Tania que me proporcionaram momentos alegria e de descontração.
- Aos meus Pais Ernani e Tania pelo amor e grandiosa educação oferecida e de que tanto me orgulho.
- À minha esposa Andréa pela paciência, atenção e por ter me proporcionado a maior alegria de minha vida, o nascimento de meu filho Tatiús.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Figuras	1
Lista de Tabelas	3
1 Apresentação	5
1.1 Medidas a favor do uso de fontes de energia renováveis no Brasil	8
1.2 Aplicações da Energia Solar	9
1.2.1 Energia Solar Para Aquecimento de Água	10
1.2.2 Energia Solar para Geração de Energia Elétrica	10
1.3 Bombeamento de Água Utilizando Energia Solar	14
1.4 Motivação	15
1.5 Tema da dissertação	16

1.6	Organização da dissertação	17
2	Energia Fotovoltáica	19
2.1	Histórico	19
2.2	Física da célula solar	21
2.2.1	Junção P-N	22
2.2.2	Efeito Fotoelétrico	23
2.2.3	Características Elétricas	24
2.2.4	Perdas nas Células solares	32
2.2.5	Tipos de células fotovoltaicas	35
3	Máxima Transferência de Potência	37
3.1	Maximização da radiação direta	37
3.2	Busca do Ponto de Operação de Máxima Transferência de Potência . .	39
3.2.1	Métodos de busca do MPP	39
4	Sistema de Bombeamento Fotovoltáico	43
4.1	Introdução aos sistemas de bombeamento	44
4.2	Inversor de Frequência	45
4.3	Bombas Hidráulicas	46
4.4	Motores elétricos	48
5	Descrição e Resultados das Simulações	49
5.1	Sistema completo	49
5.1.1	Operação no MPP empregando a corrente de curto-circuito dos painéis	52
5.2	Dados dos dispositivos simulados	53
5.2.1	Característica do painel solar simulado	53
5.2.2	Motor - Bomba	54
5.3	<i>Software</i> e outros parâmetros utilizados	54

<i>ÍNDICE</i>	xi
5.3.1 Controlador PI	55
5.3.2 Controlador nebuloso	56
5.4 Resultados da simulação	65
5.4.1 Simulações com controlador PI	65
5.4.2 Simulações com controlador nebuloso	67
6 Considerações finais	79
6.1 Conclusões	79
6.2 Sugestões de trabalhos futuros	80
Referências Bibliográficas	81

Lista de Símbolos

3ϕ Trifásico.

αI_{SC} Coeficiente de temperatura de I_{SC} .

αV_{OC} Coeficiente de temperatura de V_{OC} .

λ Comprimento de Onda.

c Velocidade da Luz.

h Constante de Planck.

k Constante de Boltzman.

w Frequência angular (rad/s).

E_f Energia do Fóton.

E_G Energia de “Gap”. Limite de Energia que um fóton deve possuir para ser convertido em eletricidade.

FF Fator de Preenchimento (Fill Factor).

I_{DC} Corrente no link DC.

I_{MPP} Corrente no MPP.

I_{PH} Fotocorrente.

I_{PV} Corrente de saída do painel solar.

I_{SAT} Corrente de saturação do diodo.

I_{SCS} Corrente de Curto-Circuito na condição padrão.

I_{SC} Corrente de Curto-Circuito.

J Inércia do MIT.

K Constante da Bomba.

K_I Ganho de integração do controlador PI.

K_P Ganho proporcional do controlador PI.

ki Relação entre I_{SC} e I_{MPP} .

L_{lr} Indutância de dispersão do estator.

L_{ls} Indutância de dispersão do estator.

G_{as} Radiação padrão ($1000W/m^2$).

G_a Radiação.

P_{HID} Potência hidráulica.

R_s 1) Resistência série do circuito equivalente do painel.

R_s 2) Resistência do estator do MI.

T_S Temperatura padrão ($25^\circ C$).

V_{DC} Tensão do link DC.

V_{OCS} Tensão de circuito aberto na condição padrão.

V_{OC} Tensão de circuito aberto.

V_{PV} Tensão nos terminais do painel solar.

V_t Tensão Térmica.

Lista de Abreviaturas

DSP Digital Signal Processor (Processador Digital de Sinais).

MI Motor de Indução.

MIT Motor de Indução Trifásico.

MME Ministério de Minas e Energia.

MPP Maximum Power Point - Ponto de máxima potência.

PCH Pequena Central Hidrelétrica.

PI Controlador Proporcional-Integral.

PID Controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

PV Fotovoltáico (photovoltaic).

PWM Pulse Width Modulation (Modulação por largura de pulso).

RF Rádio Frequência.

rpm rotação por minuto.

SVM Space Vector Modulation (Modulação por vetores espaciais).

Lista de Figuras

1.1	Sistema de aquecimento de água	11
1.2	Sistema Autônomo	11
1.3	Sistema Híbrido	12
1.4	Sistema de geração solar conectado à rede	13
2.1	Esquemático de uma célula fotovoltaica.	20
2.2	Geração do par elétron lacuna pela luz	21
2.3	Junção P-N com movimento aleatório	22
2.4	Junção P-N após difusão	24
2.5	Característica $I \times V$ de uma célula solar	25
2.6	Circuito equivalente de célula solar	26
2.7	Modelo a um diodo simplificado	27
2.8	Comportamento de parâmetros de painéis solares.	29
2.9	Diagrama de blocos do modelo de painel	30
2.10	Característica $I \times V$ obtida para diferentes níveis de temperatura	30
2.11	Característica $I \times V$ obtida para diferentes níveis de radiação	31
2.12	Radiação solar na atmosfera	32
2.13	Característica $P \times V$ obtida para diferentes níveis de temperatura	32
2.14	Sumário das perdas numa célula solar.	34
3.1	Rastreador solar ativo	37

4.1	Esquema de bombas	47
5.1	Sistema de bombeamento fotovoltaico	50
5.2	Inversor trifásico em ponte completa	51
5.3	Arranjo série/paralelo de 18 módulos solares	51
5.4	Arranjo série/paralelo de 18 módulos solares com diodos by pass	52
5.5	Característica elétrica de um arranjo de 18 módulos solares	53
5.6	Curvas características da bomba empregada nas simulações.	55
5.7	Controlador PI	56
5.8	Controlador Fuzzy	57
5.9	Conjuntos nebulosos da variável erro	58
5.10	Conjuntos nebulosos da variação do erro e da saída	59
5.11	Resposta de um sistema dinâmico típico	60
5.12	Ativação das regras	61
5.13	União dos resultados das regras ativadas	63
5.14	Ocorrência dos curto-circuitos	66
5.15	Teste de aumento da radiação solar empregando o controlador PI	70
5.16	Teste de diminuição da radiação solar empregando o controlador PI	71
5.17	Teste de aumento da radiação solar empregando o controlador nebuloso	72
5.18	Teste de diminuição da radiação solar empregando o controlador nebuloso	73
5.19	Comparação entre controlador PI e nebuloso	74
5.20	Comparação da perturbação no link CC entre o controlador PI e nebuloso	74
5.21	Diagrama de blocos do sistema em simulink	75
5.22	Detalhamento dos painéis solares	76
5.23	Detalhamento da Bomba	77
5.24	Detalhamento do sistema de controle	78

Lista de Tabelas

2.1	Comparação de dados obtidos com os dados do Fabricante - HIP-190BA3	28
5.1	Tabela de regras do controlador fuzzy	60
5.2	Exemplo de fuzzificação	61

Capítulo 1

Apresentação

A junção dos aumentos da população e da atividade industrial mundiais tem elevado a demanda por energia, cuja maior parte é proveniente da queima de combustíveis fósseis, como, por exemplo, petróleo, gás natural e carvão mineral; estes são recursos limitados e poluentes. Com isso, as energias renováveis ganham muita importância, porque podem ajudar a solucionar problemas crescentes de demanda de energia, bem como satisfazer exigências ambientais.

O termo “energia renovável” é utilizado pela comunidade científica como sendo a energia derivada de recursos tidos como fontes de energia limpa e baseadas em auto-renovação tal como luz do sol, vento, fluxo de águas, biomassa (matéria orgânica, resíduos da agricultura, industriais e das cidades). Todos esses recursos podem ser convertidos em energia elétrica para uso residencial e industrial.

Semelhante aos combustíveis fósseis, os recursos de energia renovável não estão uniformemente distribuídos pelo globo. Entretanto, cada região possui algumas fontes de energia renovável, que quando utilizadas em conjunto com fontes convencionais podem contribuir de maneira efetiva para a garantia de fornecimento de energia e para o desenvolvimento regional em cada parte do planeta, sem dependência de fontes de energia estrangeiras que muitas vezes estão sujeitas a instabilidade política (Bull, 2001).

Existe também a possibilidade de que a energia proveniente da queima de combustíveis fósseis se torne inviável devido ao aumento nos preços decorrente de interesses e disputas entre países detentores de grandes reservas. Nos últimos anos estas disputas concentraram-se principalmente no oriente médio. Na América do Sul observa-se disputas de interesse envolvendo o gás natural e petróleo da Bolívia e Venezuela, res-

pectivamente, países do quais o Brasil tem importado estes combustíveis.

Conclui-se do que foi descrito nos parágrafos anteriores que a atual conjuntura favorece suficientemente a pesquisa e o uso de energias renováveis. Os principais tipos de fontes de energia renovável são descritos a seguir (Hassmann, 1993):

Hidráulica A energia presente nas correntezas de rios, serve como força motriz para movimentar turbinas hidráulicas acopladas a geradores elétricos. Este sistema permite a geração de energia elétrica através da conversão da energia cinética presente nas correntezas de rios. O uso desta forma de conversão só é economicamente viável, do ponto de vista empresarial, para a geração de grande quantidade de energia elétrica. Apesar de ser uma alternativa confiável e consolidada, apresenta impactos ambientais que prejudicam a fauna, a flora e os ribeirinhos da região, pois uma grande área precisa ser inundada após a construção da represa. Outra desvantagem é a dependência em relação ao regime de chuvas na cabeceira dos rios, fator este que afeta substancialmente a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada. Esta dependência ficou evidente com o racionamento energético experimentado no Brasil em 2001. A conversão da energia hidráulica em pequenas quantidades tem se tornado comum por meio de aplicações de pequenas centrais hidrelétricas (PCH). As PCHs permitem que localidades isoladas que disponham de algum fluxo de água, possam gerar pequena quantidade de eletricidade muitas vezes suficiente para algumas aplicações.

Geotérmica Sistemas de geração de energia geotérmicos convertem a energia contida na rocha quente em eletricidade usando a água para absorver o calor da rocha e transportá-lo para a superfície da crosta terrestre, onde é convertido em energia elétrica utilizando turbo-geradores. A água de reservatórios de alta temperatura (240°C) é parcialmente expelida como vapor e convertida em energia mecânica ao passar por turbinas de baixa pressão, por exemplo, “Os Geysers” da Califórnia.

Eólica A velocidade dos ventos permite que turbinas eólicas acopladas a geradores elétricos transformem a energia cinética dos ventos em energia elétrica. No Brasil apesar das previsões do comitê de coordenação, planejamento e expansão do setor elétrico do Ministério de Minas e Energia (MME) indicarem um significativo crescimento do consumo de energia elétrica para a próxima década, nenhum esforço substancial tem sido feito para a exploração do potencial eólico do país. Para estimular investimentos no setor eólico é necessário elaboração de metodologias

de análise de viabilidade financeira de projetos de parques eólicos. Isto porque há muita imprecisão relacionada a velocidade de ventos e, conseqüentemente, a quantidade potência que pode ser gerada em uma específica região, o que levaria a riscos elevados de investimentos. Saliente-se que o Atlas de Potência Eólica Brasileiro demonstra que há um potencial bastante expressivo para geração de eletricidade via usinas eólicas (Salles, Melo e Legey, 2004).

Biomassa O uso de biomassa¹ como fonte de energia permite o aproveitamento de resíduos industriais e agrícolas como bagaço de cana, papelão, madeira e etc. A queima de biomassa provoca a liberação de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, mas como este composto havia sido previamente absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, o balanço de emissões de CO_2 teoricamente é nulo. Diferentes processos termo-químicos que incluem combustão, gaseificação, liquefação, hidrogenização e pirólise, têm sido usados para converter a biomassa em vários produtos utilizados como fonte de energia (Ex. biodiesel e álcool de cana). A biomassa está disponível em abundância, tem baixo custo e sua melhor utilização é convertê-la em produtos ricos em energia usando processos adequados (Goyal, Seal e Saxena, 2008). No entanto, quando se pensa em reservar áreas de plantio de biomassa, deve se levar em consideração a demanda por terras para o cultivo de alimentos evitando competição entre produção de alimentos e combustíveis.

Energia solar Existem duas possibilidades de utilização da energia solar:

1. A energia luminosa pode ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de painéis compostos de células solares utilizando o efeito fotovoltaico descrito na Seção 2.2.2. Isto representa possibilidade de geração de energia complementar, além de permitir a geração de energia elétrica em regiões remotas. Entretanto, o seu uso em grande escala ainda é inexpressivo devido ao alto investimento inicial. Porém, observa-se que nas últimas décadas o custo do sistema tem diminuído, conforme é apresentado na Seção 2.1.
2. A energia térmica do sol pode ser utilizada para aquecimento de água, gerando economia significativa de energia elétrica ou de gás já que a construção

¹Biomassa é toda matéria orgânica usada na produção de energia. Engloba produtos de florestas, resíduos orgânicos de processos industriais, agrícolas e etc. Plantas produzem biomassa continuamente através da fotossíntese.

de um sistema de aquecimento de água empregando a radiação solar é simples e sua eficiência é alta. Substituindo o fluido (água) utilizado neste sistema por um óleo, consegue-se obter temperaturas altas que adequadamente utilizadas para a geração de vapor torna possível a geração de eletricidade.

1.1 Medidas a favor do uso de fontes de energia renováveis no Brasil

Nas últimas décadas observou-se uma crescente movimentação de âmbito internacional propondo uma transição do sistema energético atual, baseado em combustíveis fósseis e energia nuclear, para um sistema energético com maior participação das fontes de energia renováveis, subordinado às práticas sustentáveis de aproveitamento de recursos naturais e medidas mitigadoras das mudanças climáticas globais. Algumas das medidas que se destacam para o fortalecimento do emprego de fontes de energia renováveis no Brasil são descritas a seguir:

- O Brasil já deu alguns passos em direção ao uso de fontes alternativas de energia, incentivando à independência em relação aos combustíveis fósseis por meio de investimento em soluções alternativas através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, instituído pela Lei N° 10.438, de 2002 e, depois, revisado pela Lei N° 10.762, de 2003. Este programa tem como objetivo favorecer o estabelecimento de novas fontes de energia disponíveis no Brasil e atrair produtores independentes. Para isso a Eletrobrás S.A. se dispôs a comprar por 20 anos a energia elétrica produzida por usinas eólicas, de biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (Senado Federal, 2003).
- A exigência de inclusão de um percentual de biodiesel no óleo diesel vendido no país, por meio da Lei n° 11.097, de 13 de janeiro de 2005, estabeleceu a obrigatoriedade da adição de um percentual mínimo de biodiesel ao óleo diesel comercializado, em qualquer parte do território nacional. Esse percentual obrigatório será de 5% após oito anos da publicação da referida lei (Senado Federal, 2005).
- A crise do petróleo na década 70 e o acentuado crescimento dos preços dos combustíveis fez com que o Brasil através do programa Proálcool² se tornasse re-

²O Proálcool foi um programa bem-sucedido de substituição em larga escala dos derivados de

ferência na produção do álcool a partir da cana-de-açúcar e na sua utilização em grande escala. A redução de tributos sobre veículos movidos a álcool ou álcool/gasolina (*Flex*) foi mais uma medida favorável à produção do álcool combustível.

- O Pacto de Ação em Defesa do Clima, considerado a primeira ação concreta de combate ao aquecimento global no Brasil após a divulgação dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC³. Tem o objetivo de promover a adoção de ações que assegurem a continuidade do desenvolvimento econômico e contribuam para reduzir as emissões de gases do efeito estufa na atmosfera. Uma das ações presentes no pacto se refere ao fomento de iniciativas que pretendam incorporar à matriz energética brasileira, de forma sustentável, energias provenientes de fontes renováveis, aproveitando as imensas potencialidades do país nessa área (CEBDS, 2007).
- A criação da LEI N° 14.459 da cidade de São Paulo, tornando obrigatória a instalação de aquecedores solares nos novos edifícios, reduzindo consideravelmente os custos com aquecedores a gás e elétricos (Câmara Municipal de São Paulo, 2007).

1.2 Aplicações da Energia Solar

O uso de energia solar para aquecimento de água e para geração de eletricidade são aplicações com tecnologia já consolidada; ambas contribuem para o aproveitamento de um recurso natural abundante e para minimizar a dependência em relação aos combustíveis fósseis. No caso específico da geração de eletricidade via placas fotovoltaicas, é possível fornecer em localidades remotas energia elétrica a um custo menor do que a rede elétrica convencional, o que consiste em um grande atrativo para sua utilização.

petróleo. Foi criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto n° 76.593, com o objetivo de estimular a produção do álcool, visando o atendimento das necessidades do mercado interno e da política de combustíveis automotivos (Oliveira, 2002).

³Intergovernmental panel on climate change - O IPCC foi estabelecido para prover aos tomadores de decisão e outros interessados uma fonte de informação objetiva sobre mudança climática. <http://www.ipcc.ch>

1.2.1 Energia Solar Para Aquecimento de Água

No Brasil o aquecimento de água é geralmente feito utilizando o calor gerado pelas resistências elétricas quando submetidas a uma corrente elétrica - efeito Joule. Este tipo de aquecimento de água tem um investimento inicial bastante baixo, mas o consumo de energia elétrica do usuário irá aumentar consideravelmente com este sistema de aquecimento. O aquecimento por gás também tem se destacado; apesar de exigir um pouco mais de investimento inicial, apresenta um custo mensal inferior ao aquecimento por resistência elétrica. No entanto, ambos os sistemas apresentam um custo alto de manutenção.

Como alternativa a redução dos custos buscou-se aproveitar o calor gerado pelo sol durante o dia e transferí-lo para a água. Esta água pode ser armazenada num compartimento isolado termicamente e usado posteriormente conforme a necessidade. Na Figura 1.1 pode ser visto um exemplo do sistema de aquecimento usando o calor do sol. O funcionamento é bastante simples e consiste na transmissão de calor através dos materiais que compõem o sistema. Existem dois componentes fundamentais que compõem tal sistema:

Coletores solares - Este componentes se encarregam de transferir o calor absorvido dos raios solares para a água. Quando a água percorre uma serpentina presente nos coletores solares, esta é aquecida e em seguida encaminhada para o reservatório térmico.

Reservatório térmico (Boiler) - Este componente é responsável por manter a água aquecida para uso posterior.

Este sistema apresenta um custo alto de instalação, porém é isento de qualquer tarifa de manutenção, portanto, a médio prazo o seu investimento inicial é recuperado.

1.2.2 Energia Solar para Geração de Energia Elétrica

Estas aplicações baseiam-se no efeito fotoelétrico descrito na Seção 2.2.2 por meio de células fotovoltaicas. Pode ser utilizada para eletrificação rural, bombeamento de água, aplicações profissionais (alimentação de centrais de telecomunicações e monitoramento remoto), geração de energia no espaço (satélites) e sistemas conectados à rede.

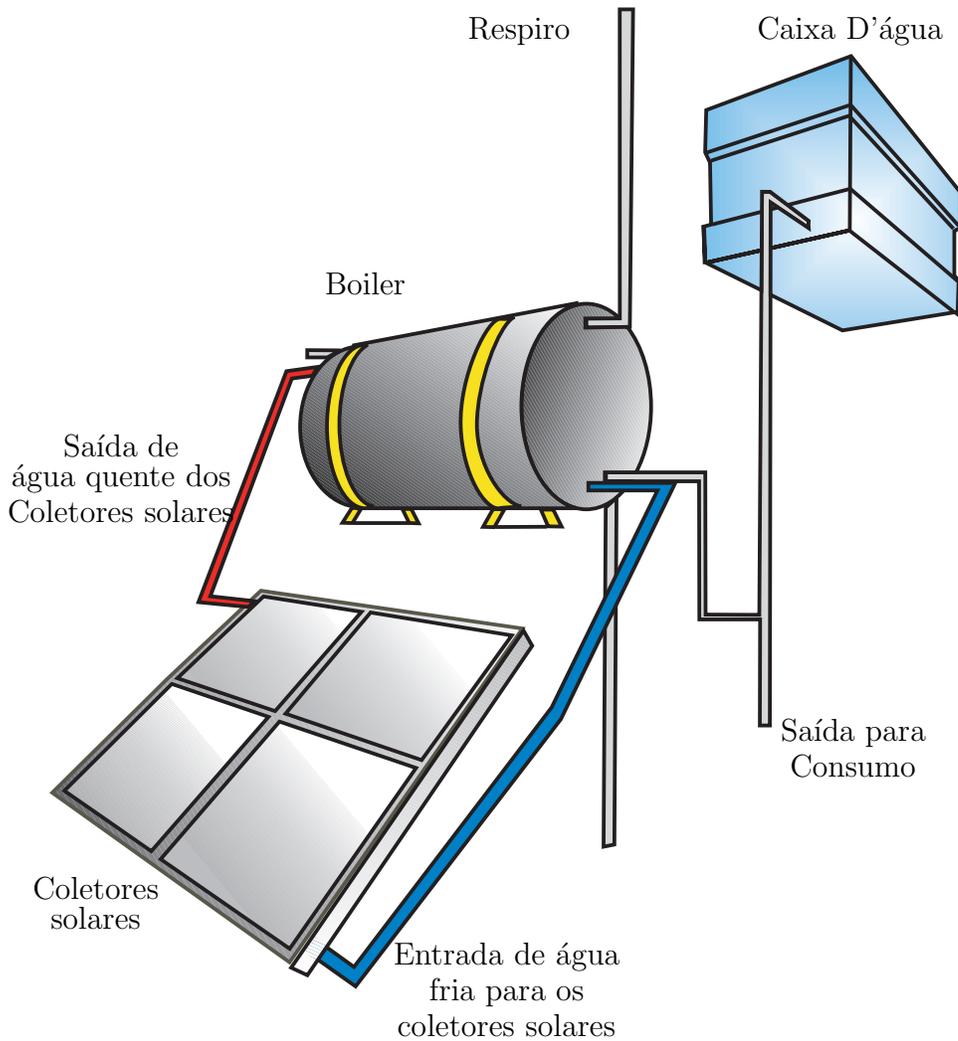


Figura 1.1: Sistema de aquecimento de água

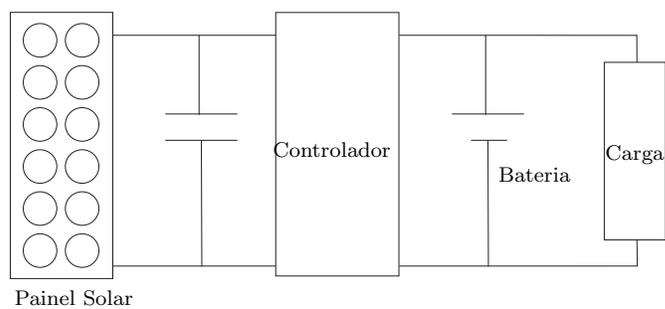


Figura 1.2: Sistema Autônomo

Existem três tipos de configuração básica para utilização de um sistema de conversão fotovoltaico: autônomo , híbrido e conectado à rede.

Sistemas autônomos são utilizados em regiões onde se busca atender a necessidade

por eletricidade, necessitam de um banco de baterias para situações de ausência de radiação solar. Este tipo de sistema possui baixa confiabilidade, pois depende muito da capacidade da bateria além de que falhas nas placas fotovoltaicas comprometem todo o sistema. A Figura 1.2 mostra um exemplo de sistema autônomo.

Sistemas híbridos possuem como vantagem em relação aos sistemas autônomos a utilização de outra fonte de energia complementar, como geradores movidos a diesel, a célula combustível e eólicos, ver Figura 1.3. A utilização de outros sistemas de geração possibilita maior confiabilidade ao sistema que pode atender a demanda em situações de ausência de radiação solar.

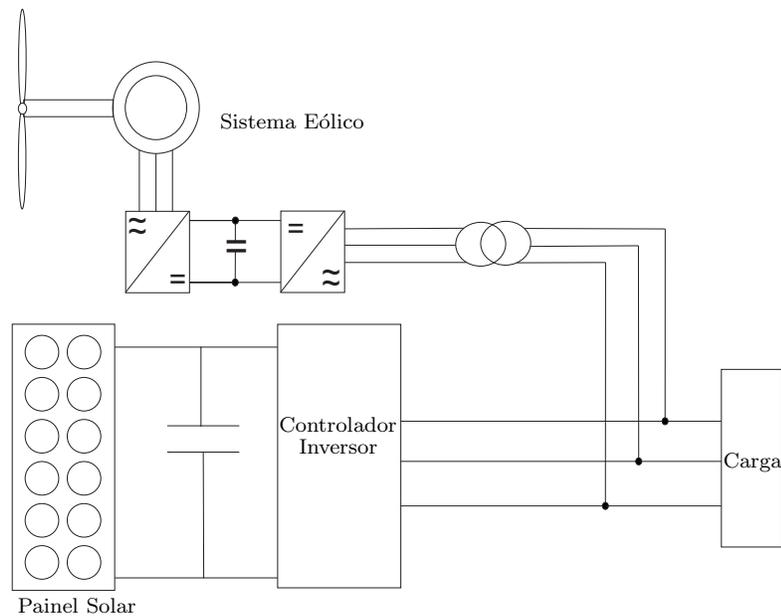


Figura 1.3: Sistema Híbrido

Sistemas conectados à rede Possuem uma vantagem adicional de garantia de alimentação da carga pela rede, o que aumentaria ainda mais a confiabilidade do sistema. No entanto, o acoplamento de tal sistema à rede elétrica exige que a energia elétrica acoplada esteja em sincronia e regulada com a da rede. Exige-se também que haja proteção contra ilhamentos⁴. A Figura 1.4 mostra um exemplo de sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica conectado à rede. Este tipo

⁴Ilhamento ocorre quando o fornecimento de energia da rede elétrica é suspenso e o sistema complementar é mantido funcionando. O sistema complementar pode não suportar a demanda de energia além de oferecer riscos aos operadores da rede em caso de parada para manutenção (Zeineldin, El-Saadany e Salama, 2006),(John e Kolwalkar, 2004)

de topologia tende a se tornar bastante comum, pois funciona complementando o sistema convencional aumentando a oferta de energia e fornecendo à rede a energia excedente, esta forma de geração é conhecida como geração distribuída, ou dispersa (Blaabjerg, Chen e Kjaer, 2004).

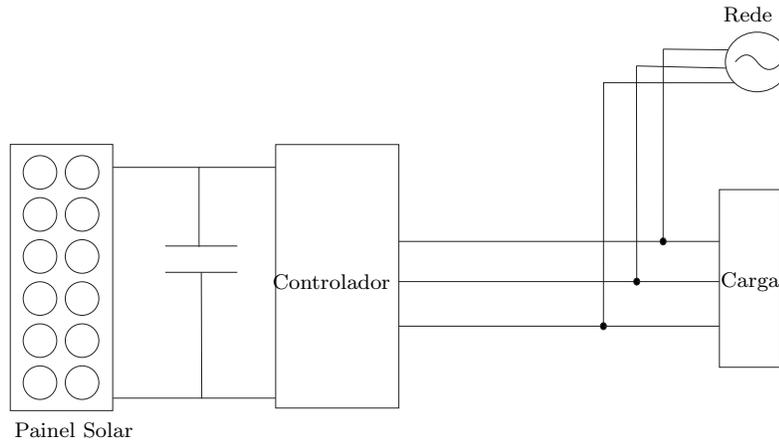


Figura 1.4: Sistema de geração solar conectado à rede

Além das baterias, uma outra maneira de se armazenar a energia proveniente da radiação solar é a sua utilização na produção de hidrogênio a partir da água. Esta alternativa é mais do que um simples armazenamento, ela é uma nova forma de energia que está de acordo com as exigências ambientais. Atualmente o hidrogênio é obtido, em sua grande maioria a partir do gás natural para um mercado muito limitado. O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo, o mais simples combustível químico, que carrega uma energia limpa e altamente eficiente. Ele possui o potencial de abastecer veículos de transporte sem emissão de poluentes, fornecer calor para processos industriais, produzir eletricidade para sistemas de potência centralizados ou distribuídos e fornecer um meio de armazenamento de eletricidade proveniente de fontes energia renovável. Os maiores desafios para a sua produção em larga escala, principalmente no setor de transportes, são desenvolver processos econômicos de produção e métodos adequados de armazenamento.

Uma questão importante no projeto de sistemas híbridos ou de sistemas conectados à rede é o compartilhamento da carga entre as diversas fontes que operam em paralelo exigindo técnicas de controle eficientes (Marwali, Jung e Keyhani, 2004).

Uma outra aplicação inovadora está na utilização de módulos solares integrados às estruturas dos prédios e fábricas reduzindo ainda mais o custo da implantação da

energia fotovoltaica. A economia comparada com as fontes convencionais é maior se os custos sociais e ambientais forem considerados.

1.3 Bombeamento de Água Utilizando Energia Solar

A tecnologia fotovoltaica apresenta vantagens em vários aspectos, iniciando pelo fato de que o recurso solar ocorre em quase todo o globo terrestre sem nenhum custo. A diferença é que há regiões com maiores e menores potenciais de energia solar, porém esta disparidade é solucionada por meio de um dimensionamento adequado do sistema.

No caso de localidades isoladas e que não possuem rede elétrica, quando o processo de bombeamento de água não é feito manualmente, geralmente utiliza-se um conjunto composto por um motor a combustão (geralmente a óleo diesel) e um gerador elétrico. Este sistema apresenta como grande desvantagem os gastos constantes com aquisição e transporte de combustível.

As tecnologias para o aproveitamento da energia fotovoltaica já se encontram consolidadas tecnicamente e possuem um alto grau de confiabilidade, tendo o gerador uma vida útil em torno de 25 anos, o que as tornam opções viáveis para a solução de problemas de escassez de água no meio rural. O custo de investimento inicial ainda é uma grande barreira a ser superada, em parte, por uma produção em larga escala, e, em parte, por incentivos à sua produção e aquisição.

Apesar de o efeito fotovoltaico ter sido observado pela primeira vez pelo físico francês Edmund Becquerel, em 1839, e de as primeiras aplicações datarem da década de 1950, o bombeamento fotovoltaico somente se deu de forma comercial no final da década de 1970.

Um sistema de bombeamento fotovoltaico é composto basicamente de:

Arranjo de módulos fotovoltaicos Estes são a fonte de energia elétrica CC para o sistema, a configuração adequada série/paralelo dos diversos módulos possibilita que o arranjo forneça diferentes níveis de tensão e corrente.

Conversor CC-CC Este é um componente que serve basicamente para regular a tensão de saída do painel solar elevando ou abaixando a sua amplitude.

Inversor de frequência Este converte a energia elétrica dos terminais do conversor CC em energia elétrica CA ou converte diretamente do arranjo de módulos fotovoltaicos quando não for necessário o conversor CC.

Motor de Indução (MI) Converte a energia elétrica CA em energia mecânica rotacional.

Bomba Utiliza a energia mecânica do MI e transfere para a água na forma de energia cinética.

Reservatório de água Este componente garante a continuidade do fornecimento de água. Ele é dimensionado de acordo com a demanda e com o tempo em que o sistema não estará operando.

Diferentemente das aplicações de energia solar para fornecimento de eletricidade para domicílios, os sistemas de bombeamento fotovoltaicos não necessitam de baterias eletrolíticas para períodos de baixa radiação solar, ao invés das baterias utilizam-se os reservatórios de água que, se bem dimensionados, suprem as necessidades em condições de baixa radiação solar durante determinado período (Fedrizzi, 2003).

1.4 Motivação

Os sistemas de bombeamento fotovoltaicos possuem um rendimento muito baixo devido à baixa eficiência intrínseca dos painéis solares. Isto exige que o restante do sistema seja projetado para ter o mínimo de perdas a fim de que a eficiência global do sistema não seja comprometida.

No início da década de 1980, a eficiência média total de um sistema de bombeamento era de 2%. No entanto, graças ao aumento das eficiências individuais dos equipamentos, sistemas com eficiência média total acima de 5% já são uma realidade. Atualmente, um bom sistema comercial conta com eficiência dos módulos fotovoltaicos entre 12% e 15%, e eficiência do restante do sistema entre 30% e 40%. Assim, é imperativo o desenvolvimento de pesquisas objetivando o aumento da eficiência de tais sistemas.

A Seção 2.2.3 abordará as características elétricas da célula solar e será observado que existe uma condição ótima de trabalho para o módulo fotovoltaico dependente das

condições do ambiente - temperatura e radiação incidente. Este ponto ótimo de trabalho é conhecido como MPP (Maximum Power Point), ou ponto de máxima potência. No MPP, o módulo solar converte em energia elétrica o máximo de energia solar disponível. A literatura apresenta inúmeras técnicas que levam o painel solar a trabalhar no MPP (Esrám e Chapman, 2007).

Nota-se que a melhora do rendimento do sistema de bombeamento faz com que a eficiência global seja aumentada. Isto tem um impacto positivo nos custos do sistema, tornando cada vez mais viável a sua implantação. Conseqüentemente, muitas comunidades isoladas poderiam ser beneficiadas com abastecimento de água via energia fotovoltaica devido a melhora econômica (pela melhora na produtividade agrícola, por exemplo) e a melhora na qualidade de vida.

1.5 Tema da dissertação

Este trabalho visa melhorar o rendimento de um sistema de bombeamento fotovoltaico; isto será realizado através do encontro do ponto de máximo rendimento da placa solar a cada instante de amostragem, garantindo ótimo rendimento ao sistema de bombeamento independentemente da radiação solar ou temperatura. Os resultados das simulações servirão para levantamento dos problemas e para utilização em trabalhos futuros. O sistema deve responder a mudanças do ponto de operação devido a alterações das condições do ambiente - intensidade luminosa. Levando o sistema a operar no MPP. Para que seja possível uma simulação completa do sistema do ponto de vista de circuitos o modelo proposto por Xiao, Dunford e Capel (2004) será adaptado.

Além da discussão de diversas alternativas para bombeamento usando energia solar são realizadas simulações de um sistema específico no qual há maximização da eficiência utilizando-se o valor da corrente de curto-circuito das placas solares; o valor desta corrente é diretamente ligado ao ponto de máxima eficiência. O curto é dado periodicamente e com o uso de um controlador é obtida uma frequência de acionamento do motor de indução. Dois controladores foram avaliados, que são o tradicional proporcional-integral (PI) e o nebuloso (*fuzzy*).

1.6 Organização da dissertação

O Capítulo 2 desta dissertação apresenta um breve histórico da energia fotovoltaica, a evolução das eficiências e custos de produção. Em seguida apresenta-se o efeito fotoelétrico e é feita uma análise das características elétricas através do circuito equivalente. É analisado o efeito da radiação e da temperatura na capacidade de conversão de energia dos painéis solares. Aborda-se as perdas no processo de conversão que provocam o baixo rendimento das células fotovoltaicas. E por fim é mostrado os principais tipos de células solares que estão sendo utilizados atualmente.

No Capítulo 3 é visto as principais técnicas que levam ao melhor aproveitamento da energia disponível no painel solar. É apresentada as técnicas de maximização da radiação direta e de rastreamento do ponto de máxima potência. Ainda no Capítulo 4 são apresentados os sistemas de bombeamento de água que utilizam energia fotovoltaica e apresentando seus pontos positivos em relação aos métodos de bombeamento de água convencionais. É feita uma descrição das partes integrantes mostrando os tipos de equipamentos utilizados e os critérios de escolha dos componentes do sistema proposto neste trabalho.

No Capítulo 5 são apresentados os modelos e parâmetros usados nas simulações no Simulink/Matlab de um sistema de bombeamento de água empregando energia elétrica solar. Os resultados destas simulações são exibidos e analisados em sequência.

A dissertação se encerra no Capítulo 6, que apresenta as conclusões finais e as sugestões para a realização de trabalhos futuros baseados no sistema proposto.

Capítulo 2

Energia Fotovoltáica

O presente capítulo apresenta aspectos históricos do desenvolvimento das primeiras células solares até as atuais, que são mais eficientes e baratas. É feita a apresentação do efeito fotoelétrico e uma comparação entre as características de uma junção P-N com uma célula solar. Em seguida é apresentado o modelo baseado no circuito equivalente que será utilizado nas simulações. A baixa eficiência dos painéis solares é justificada com o estudo das perdas fundamentais do processo de conversão da energia luminosa em energia elétrica. Os tipos de células mais utilizados atualmente também serão abordados. A célula solar é um semicondutor que converte um fluxo de fótons em corrente elétrica. Durante a absorção da energia dos fótons são criados pares elétron-lacuna que darão origem à corrente. A característica $I \times V$ modela o comportamento da célula e depende da temperatura e da radiação solar. Outra modelagem é através de circuito elétrico e os parâmetros do circuito equivalente estão relacionados com propriedades construtivas da célula. A característica $I \times V$ possui um ponto de operação em que a conversão de potência é máxima e também sofre influência da radiação e temperatura. As perdas na conversão fotovoltaica são abordadas. Os principais tipos de células solares produzidos são apresentados.

2.1 Histórico

A energia de radiação solar é originada de uma reação de fusão nuclear no sol. A massa perdida do Sol é convertida em energia, como descrita pela relação de Einstein, $E = mc^2$, numa taxa de $4 \times 10^{26} W$. Esta energia é principalmente emitida como

radiação eletromagnética na região espectral de $0,2-3\mu m$. Cálculos demonstram que o sol pode gerar energia radiativa aproximadamente constante por um período de 10 bilhões de anos (Markvart, 2000).

Em 1839, Edmund Becquerel, físico francês descobriu o efeito fotovoltaico em experimentos com uma célula eletrolítica feita de dois eletrodos de metal inseridos numa solução condutora. Mas somente 120 anos mais tarde, em 1954, pesquisadores do Bell Labs nos Estados Unidos da América desenvolveram a primeira célula solar de silício com uma eficiência razoável de 4,5%. Desde então, o rápido desenvolvimento da tecnologia de células solares de silício tem sido impulsionado, inicialmente, pelo interesse em conversão fotovoltaica como fonte de energia para satélites e, atualmente, tem se destacado pelo fornecimento de eletricidade em localidades isoladas.

Com a tecnologia de dispositivos planos, desenvolvidos na indústria de microeletrônica, a estrutura da célula solar evoluiu nos anos 60 para a estrutura mostrada na Figura 2.1 (Szlufcik, Sivoththaman, Nijs, Mertens e Overstraeten, 1997).

Desde então o que se observou foram constantes melhoras no desempenho das células solares, reduções drásticas em seus custos e uma grande variedade de projetos e de materiais (Schwartz, 1993). O custo das células solares caiu de aproximadamente US\$50/W nos anos 1980 para cerca de US\$5/W atualmente; o custo de energia solar caiu de US\$0,90/ $kW \cdot h$ em 1980 para cerca de US\$0,20/ $kW \cdot h$. Apesar deste custo ainda ser alto comparado com a energia elétrica gerada a partir de fontes convencionais, o mercado está favorável para aplicações específicas como alimentação de dispositivos de telecomunicações, iluminação e sinalização (em locais como, por exemplo, rodovias muito longas) e desenvolvimento de algumas regiões; em todas as aplicações citadas a energia solar é economicamente viável se a rede elétrica de distribuição não está presente. A incorporação de painéis solares nas estruturas das construções civis para geração de eletricidade também é uma área que está em amplo crescimento.

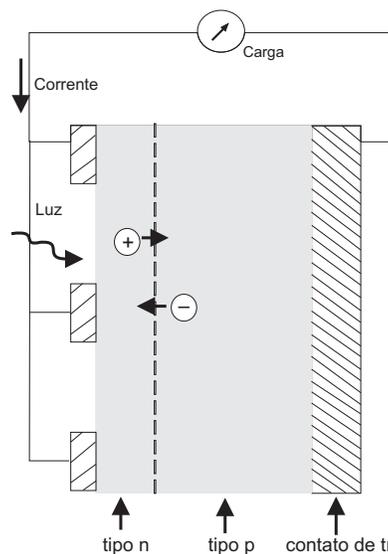


Figura 2.1: Esquema de uma célula fotovoltaica. Fonte:Markvart (2000)

Um novo tipo de tecnologia fotovoltaica está emergindo, o gerador termofotovoltaico. Enquanto células solares convencionais, conforme discutido acima, utilizam somente a energia luminosa para gerar eletricidade, o gerador termofotovoltaico usa também o calor, ou radiação infravermelha, para gerar eletricidade; desta maneira o gerador pode operar à noite ou quando o céu está nublado, eliminando a necessidade de baterias. Utiliza semicondutor para conversão em lugar de geradores a diesel convencionais, resulta em maior rendimento de conversão, modularidade, poluentes reduzidos, operação em silêncio, e alta confiabilidade. Geradores termofotovoltaicos poderiam gerar eletricidade a partir do excesso de calor em veículos elétricos híbridos ou de processos industriais (Bull, 2001).

2.2 Física da célula solar

A conversão de energia fotovoltaica pode ser explicada a partir da natureza quântica da luz. Desta forma, entende-se a luz como um fluxo de partículas - fótons - que carregam energia e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$E_f(\lambda) = \frac{h c}{\lambda} \quad (2.1)$$

sendo h a constante de Planck, c a velocidade da luz, e λ o comprimento de onda da luz. Em um dia sem nuvens, aproximadamente $4,4 \times 10^{17}$ fótons atingem um centímetro quadrado da superfície da Terra por segundo.

Somente alguns desses fótons - aqueles com energia maior do que o “gap” de energia do semicondutor (E_G) - podem ser convertidos em eletricidade pela célula solar, ver Figura 2.2. Quando um fóton penetra no semicondutor, ele pode dar energia suficiente para um elétron sair da banda de valência e entrar na banda de condução. Visto que o elétron deixou uma lacuna na banda de valência, o processo de absorção de luz gera pares elétron-lacuna.

Cada tipo de semicondutor é capaz de converter apenas uma parte do espectro da

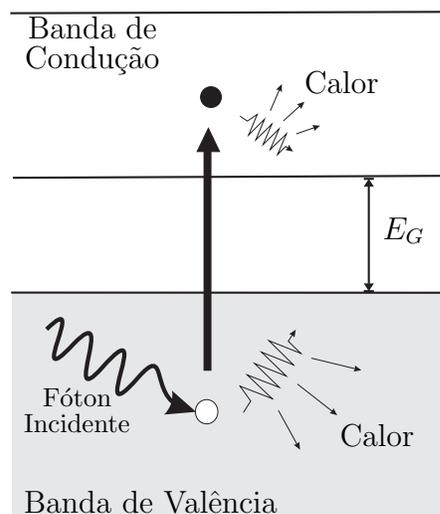


Figura 2.2: Geração do par elétron lacuna pela luz. Fonte:Markvart (2000)

luz do Sol. Uma célula de silício é capaz de converter dois terços do fluxo de fótons total de todo o espectro. Além disso, a natureza do processo de absorção indica como uma parte da energia do fóton é perdida. De fato, nota-se que todos os pares elétron-lacuna têm energia maior do que a necessária para passar para a banda de condução. O excesso de energia é perdido em forma de calor e não pode ser convertido em energia útil. Como será visto na Seção 2.2.4 esta perda de energia representa um dos mecanismos de perdas fundamentais numa célula solar (Markvart, 2000).

2.2.1 Junção P-N

A junção P-N é a região de fronteira entre dois cristais de silício ou de germânio, dopados com elementos que caracterizam o seu tipo, ou N ou P. O cristal tipo P necessita de elétrons para se estabilizar e o cristal tipo N tem excesso de elétrons.

A necessidade de um elétron representa que o cristal tem uma lacuna que precisa ser preenchida por um elétron. Os portadores de carga são os elétrons e lacunas. Quando se estabelece a união de um cristal tipo P e N o movimento por difusão cria uma região neutra devido à recombinação elétron-lacuna. Nesta região neutra não há nem lacunas nem elétrons em excesso, durante a recombinação a região neutra aumenta e dificulta a passagem de elétrons e lacunas, é criado assim um potencial elétrico. Ver Figuras 2.3 e 2.4.

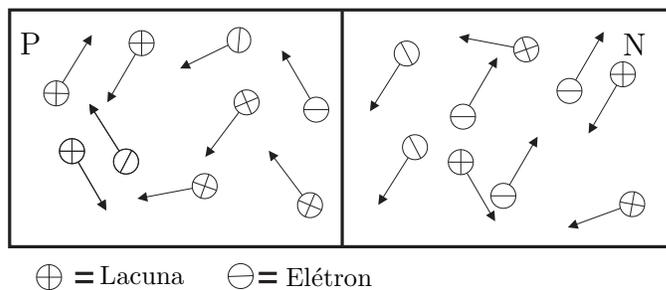


Figura 2.3: Junção P-N com movimento aleatório

A energia luminosa incidente em um material pode ser refletida, transmitida (refratada) ou absorvida. A absorção não é nada mais que a conversão da energia contida nos fótons para outro tipo de energia, geralmente térmica. Entretanto, alguns materiais possuem as propriedades adequadas para converter esta energia em energia elétrica.

Esta transferência de energia dos fótons para os átomos do material, é regida pelas leis de conservação do momento e da energia. Dependendo da energia do fóton o elétron pode ser elevado a um nível mais alto da eletrosfera ou pode ser liberado do átomo. Estes elétrons liberados podem mover-se pelo cristal aleatoriamente se for gerado pelo aumento de temperatura, seguindo algum campo elétrico ou de uma região de maior concentração para outra de menor concentração - difusão Figura 2.3.

2.2.2 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotovoltaico é a conversão direta de energia luminosa em energia elétrica. Os geradores fotovoltaicos não possuem partes móveis¹, não geram ruído e nem poluentes.

Os painéis solares são feitos de material semicondutor que tem seus elétrons energizados quando expostos à radiação. Uma vez energizados, eles se movem pelo material provocando uma corrente DC como em uma bateria. A energia gerada pode ser utilizada imediatamente ou armazenada em baterias para ser utilizada à noite ou quando a radiação não for suficiente para alimentar a carga.

A física de uma célula solar se parece muito com a física de uma junção P-N. Quando a célula solar está sob incidência de luminosidade parte da energia absorvida dos fótons é transferida para os elétrons do material, gerando portadores de carga e a outra parte é liberada na forma de calor. Estes portadores de carga podem ser elétrons numa solução eletrolítica, ou pares lacuna-elétron num material semicondutor sólido. Os portadores de carga geram um gradiente de campo elétrico no local da junção P-N que são acelerados pelo campo e circulam em forma de corrente através de um circuito externo.

A origem do potencial fotovoltaico está na diferença entre o potencial químico, chamado de nível de Fermi, dos elétrons de dois materiais isolados. Quando os dois materiais são unidos a junção tende a um novo equilíbrio termodinâmico. Este equilíbrio só pode ser alcançado quando o nível de Fermi é igual nos dois materiais e isto ocorre na transferência de elétrons de um material para o outro até a diferença de tensão ser estabelecida entre os dois materiais que tem potencial igual à diferença do nível de Fermi inicial. É este potencial que inicia a fotocorrente. A formação do campo elétrico

¹Sistemas com Sun-tracker possuem partes móveis ver Seção 3.1

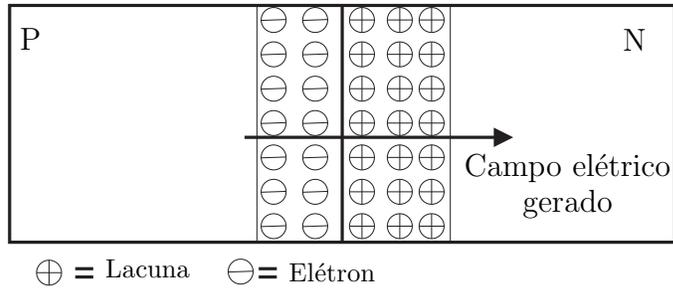


Figura 2.4: Junção P-N após difusão

em uma junção P-N pode ser encontrada em mais detalhes nos livros de eletrônica de semicondutores (Messenger e Ventre, 2004).

2.2.3 Características Elétricas

A característica corrente *versus* tensão, para um certa condição de radiação e temperatura, é exibida na Figura 2.5. Geralmente o fabricante fornece informações referentes ao painel sob condições padrão de radiação ($G_{as} = 100w/m^2$) e temperatura ($T_s = 25^\circ C$). As informações são:

P_{MPP} Potência no MPP

V_{MPP} Tensão no MPP

I_{MPP} Corrente no MPP

V_{OCS} Tensão de circuito aberto na condição padrão

I_{SCS} Corrente de curto-circuito na condição padrão

α_{VOC} Coeficiente de temperatura de V_{OC}

α_{ISC} Coeficiente de temperatura de I_{SC}

A característica $I \times V$ possui vários pontos importantes. Um deles é a corrente de curto-circuito I_{SC} (obtida quando os terminais elétricos do painel solar são curto-circuitados) que é simplesmente a fotocorrente gerada I_{PH} ; esta é constante para uma dada condição de temperatura e radiação. Um outro é o ponto da tensão de circuito aberto V_{OC} (obtida quando os terminais elétricos do painel solar está sem carga); neste

caso $I = 0$. Há também o ponto de máxima transferência de potência (MPP), que é o ponto 3 mostrado na Figura 2.5. Observe que a máxima potência que pode ser convertida em eletricidade, é equivalente à área do maior retângulo que pode ser inserido no interior da característica $I \times V$ e esta potência é dada por:

$$P_{MPP} = V_{MPP} I_{MPP} \quad (2.2)$$

A Figura 2.5 mostra também que quando o painel solar opera no MPP, significa que a carga acoplada está perfeitamente casada com o painel, ou seja, a carga é o R_{opt} . Para o painel operar no MPP mantendo o valor da carga fixo, é necessário haver um conversor CC-CC ou inversor, entre o módulo solar e a carga, sendo visto como uma carga variável pelo painel solar. Este problema de busca do MPP é abordado detalhadamente no Capítulo 3. É possível perceber duas regiões na curva $I \times V$ uma é aquela em que praticamente não há alteração da corrente de saída, conhecida como fonte de corrente. A outra é aquela onde a tensão de saída se mantém aproximadamente constante conhecida como fonte de tensão. O MPP ocorre no vértice entre estas duas regiões.

Todos os dados apresentados são necessários para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente a ser utilizado nas simulações.

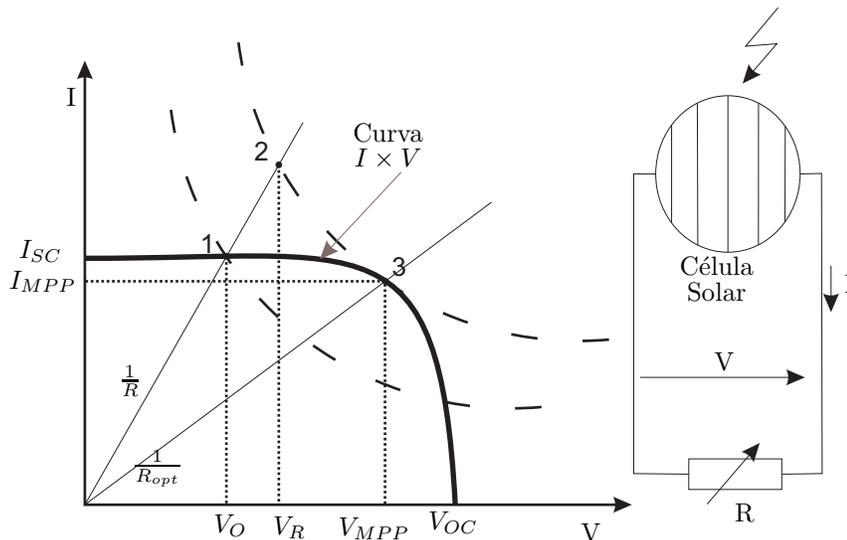
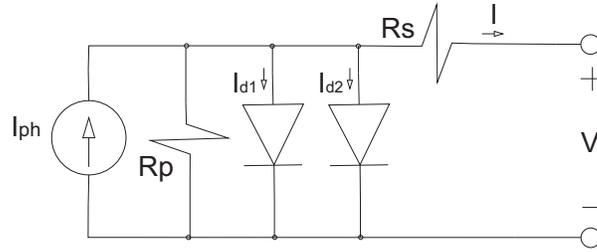
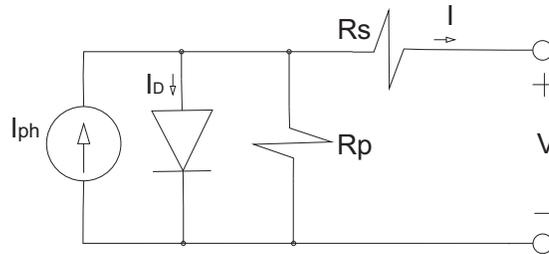


Figura 2.5: Característica $I \times V$ de uma célula solar

Os testes para determinação dos parâmetros do painel geralmente requerem equipamentos caros e os testes mais simples podem não reproduzir as características elétricas



(a) Circuito com dois diodos



(b) Circuito com um diodo

Figura 2.6: Circuito equivalente de célula solar

da célula solar com qualidade. Portanto, tem se buscado métodos de modelagem do painel solar utilizando somente os parâmetros fornecidos nos *datasheets* dos fabricantes, como mostra Xiao et al. (2004), Gow e Manning (1999) e Chenni, Makhoulf, Kerbache e Bouzid (2007).

Circuito Equivalente

Para análise do comportamento de um módulo fotovoltaico integrante de um sistema de bombeamento é importante ter disponível um modelo que represente satisfatoriamente a realidade. Os modelos mais encontrados na literatura são aqueles com dupla exponencial (dois diodos, Figura 2.6(a)) e aqueles com exponencial única (um diodo, Figura 2.6(b)). O modelo que será empregado no decorrer desta dissertação é aquele com um diodo, por ser mais simples e por reproduzir com precisão razoável as características de uma célula solar (Gow e Manning, 1999).

O circuito equivalente mostrado na Figura 2.6(b) pode ser ainda mais simplificado rejeitando-se o resistor paralelo R_p , como pode ser visto na Figura 2.7. Então, a corrente de saída é escrita da seguinte forma:

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_{SAT} \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{V_t} \right)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

sendo I_{PH} a fotocorrente e I_{SAT} é corrente de saturação do diodo.

Com os terminais da célula solar em curto-circuito observa-se do modelo da Figura 2.7 que a relação entre as correntes nesta condição é dada por:

$$I_{PH} = I_D + I_{SC} \quad (2.4)$$

A queda de tensão no diodo ($\Delta V = R_s I$) nesta condição é muito pequena, portanto a corrente I_D pode ser desprezada. Sabe-se que a fotocorrente é diretamente proporcional à radiação e considerando-se o efeito da temperatura tem-se:

$$I_{PH} = I_{SCS} \frac{G_a}{G_{as}} [1 + \alpha I_{SC} (T - T_s)] \quad (2.5)$$

Sendo, I_{SCS} a corrente de curto-circuito na condição padrão, G_a a radiação e T a temperatura.

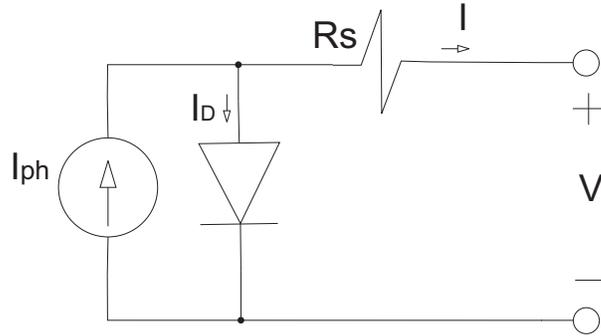


Figura 2.7: Modelo a um diodo simplificado

Considerando circuito aberto e lembrando que a tensão de circuito aberto depende da temperatura, tem-se que:

$$V_{oc} = V_{ocs} + \alpha V_{oc} (T - T_s) \quad (2.6)$$

Observa-se também que nesta condição:

$$I_{PH} = I_D \quad (2.7)$$

com base na Equação de Shockley a corrente no diodo pode ser escrita como

$$I_D = I_{SAT} (e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1) \quad (2.8)$$

sendo que

Tabela 2.1: Comparação das variáveis do fabricante ($P_{MPP-ref}$ e $V_{MPP-ref}$) com as obtidas com parâmetros encontrados da modelagem (P_{MPP} e V_{MPP}).

T (°C)	A	R_s	P_{MPP}	$P_{MPP-ref}$	Erro Rel (%)	V_{MPP}	$V_{MPP-ref}$	Erro Rel (%)
0	1,9935	0,0025	204,64	204,25	0,19%	59,11	59,03	0,14%
25	1,7630	0,0044	189,80	190,00	0,11%	54,75	54,80	0,09%
50	1,5420	0,0066	175,61	175,75	0,08%	50,54	50,57	0,06%
75	1,3290	0,0092	162,05	161,50	0,34%	46,47	46,34	0,28%

- $V_t = \frac{AkT}{q}$ é a tensão térmica, com a letra A representando o fator de idealidade;
- I_{SAT} é a corrente de saturação do diodo que é função radiação e temperatura.

Usando as equações 2.8 e 2.5 obtém-se:

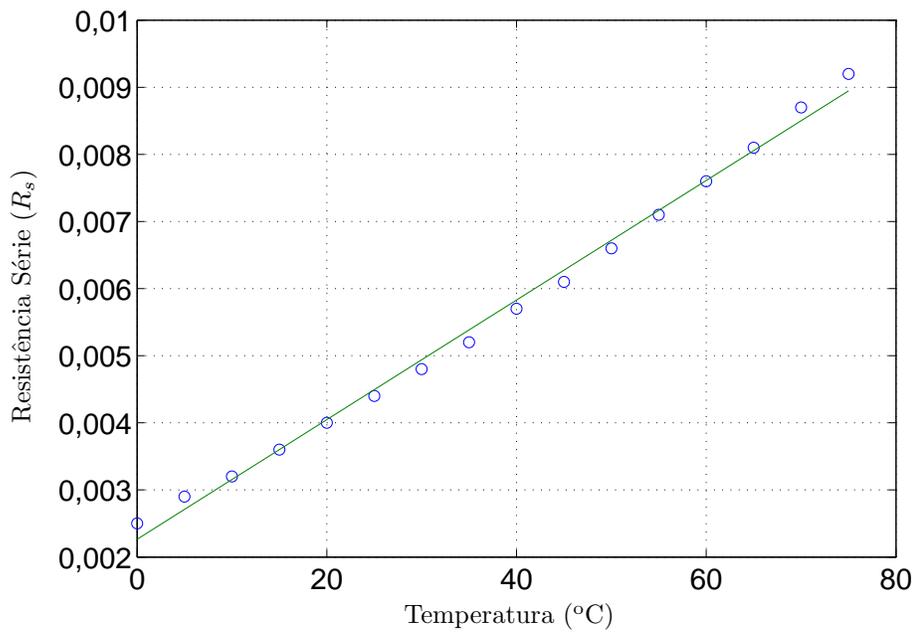
$$I_{SAT} = \frac{I_{PH}}{\left(e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1\right)} \quad (2.9)$$

Os parâmetros R_s e A sofrem influência da temperatura e muitos trabalhos de bombeamento fotovoltaico não levam em consideração tal influência. O comportamento dos parâmetros R_s e A em relação à temperatura é exibido na Figura 2.8.

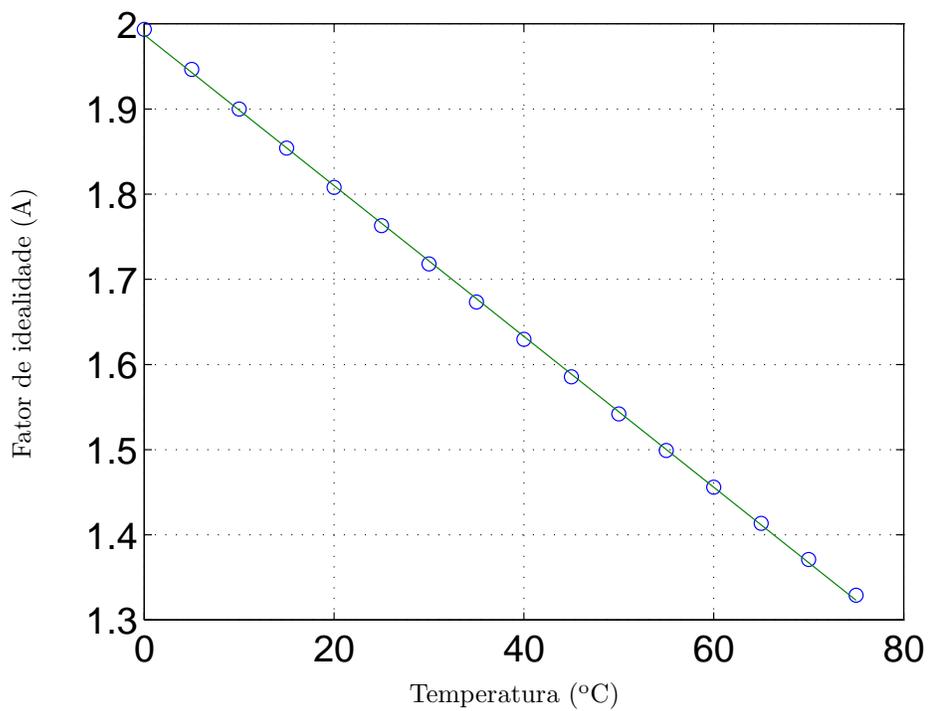
Xiao et al. (2004) mostra um modelo em que se fornece, como dado de entrada, para o painel solar a radiação, a temperatura e a tensão, sendo a variável de saída a corrente, como pode ser observado na figura 2.9(a). Para facilitar a simulação do módulo solar num sistema em que a tensão e corrente são obtidas dependendo da carga acoplada, adaptou-se o modelo de maneira que, ao conectar uma carga do Blockset Simpowers, o valor de tensão e corrente do painel fossem obtidos dependendo do valor da carga, da radiação e da temperatura como pode ser visto na Figura 2.9(b).

A característica $I \times V$ do painel solar HIP-190BA3 da Sanyo foi obtida a partir dos dados do *datasheet* do fabricante. Na Figura 2.10 considera-se o nível de radiação padrão de $1000W/m^2$ e traça-se as curvas para diferentes temperaturas e na Figura 2.11 considera-se a temperatura padrão de $25^\circ C$ e traça-se as curvas para diferentes níveis de radiação.

Os resultados obtidos no levantamento da curva característica do painel solar demonstram que o modelo representa com um bom grau de precisão as características reais conforme mostra a Tabela 2.1.



(a) Resistência série



(b) Fator de idealidade

Figura 2.8: Comportamento de parâmetros de painéis solares.

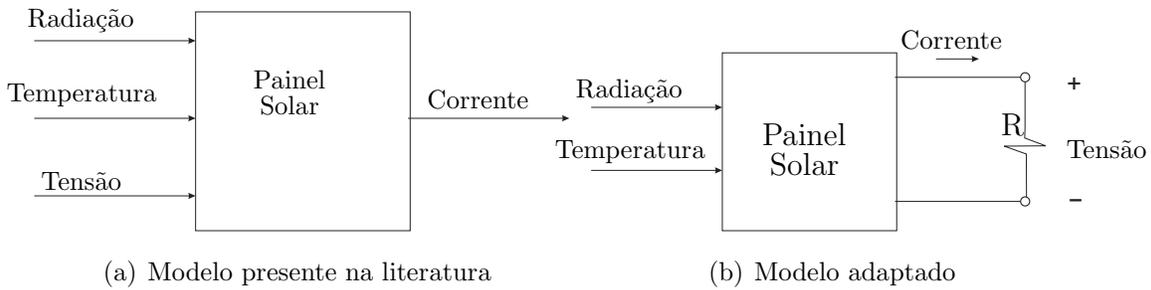


Figura 2.9: Diagrama de blocos do modelo de painel

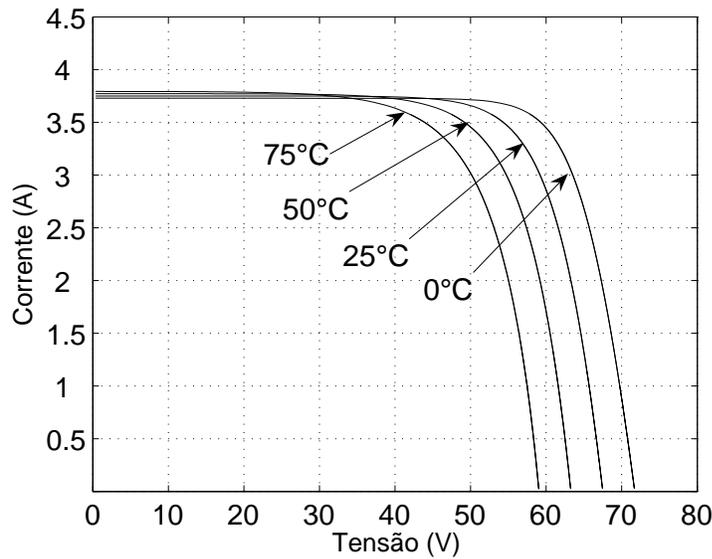


Figura 2.10: Característica $I \times V$ obtida do modelo para diferentes temperaturas

Efeito da Intensidade Luminosa

As células solares sob efeito de luminosidade disponibilizam determinada quantidade de potência elétrica; a intensidade luminosa incidente na célula solar é preponderante na determinação da potência disponível no painel solar.

A potência gerada em um módulo fotovoltaico não depende apenas da potência contida na luz do sol, mas também do ângulo entre o módulo e o sol, sendo máxima quando este ângulo é 90° .

Esta intensidade luminosa ou radiação global é muitas vezes determinada a partir da radiação direta e indireta (ver Figura 2.12). A radiação global incidente num painel solar inclinado possui três componentes: a direta que é aquela transmitida sem desvios, a refletida no solo (albedo) e a difusa. A radiação direta é a que contribui mais para

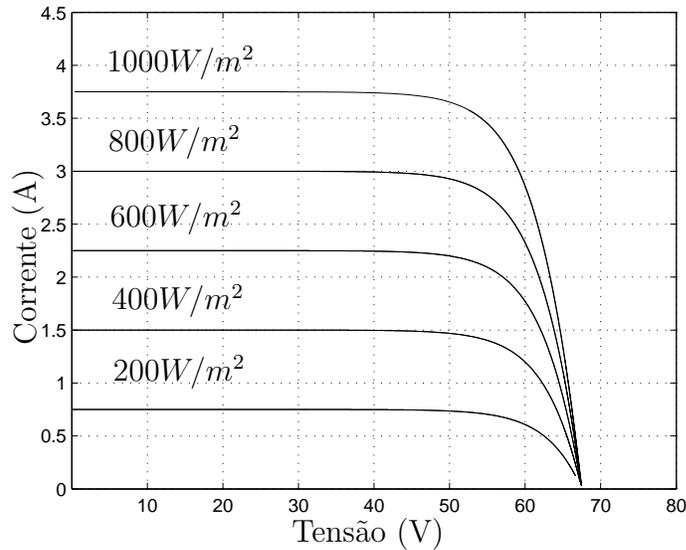


Figura 2.11: Característica $I \times V$ obtida do modelo para diferentes níveis de radiação

a disponibilidade de potência. Sendo que em algumas aplicações utiliza-se mecanismos que otimizem o seu aproveitamento, como: 1) através do uso de rastreadores de radiação direta e dispositivos que movem o painel solar na sua direção ou; 2) uso de lentes concentradoras da luz solar.

O efeito da mudança de intensidade luminosa é percebido na variação da capacidade de corrente do painel, já que a corrente de curto-circuito varia proporcionalmente com a variação de intensidade luminosa.

Efeito da temperatura

A eficiência de conversão de energia solar em elétrica diminui com o aumento da temperatura do painel fotovoltaico como é mostrado na figura 2.13.

A tensão de circuito aberto apresenta uma relação que pode ser considerada linear com a temperatura. O aumento da temperatura provoca uma diminuição da tensão nos terminais e uma perda de potência. As variáveis do modelo que sofrem influência da temperatura são o fator de idealidade do modelo e a resistência série. A influência da temperatura na corrente não é significativa, sendo geralmente desprezada no modelo do painel.

Alguns sistemas utilizam mecanismos de refrigeração do painel para atenuar o

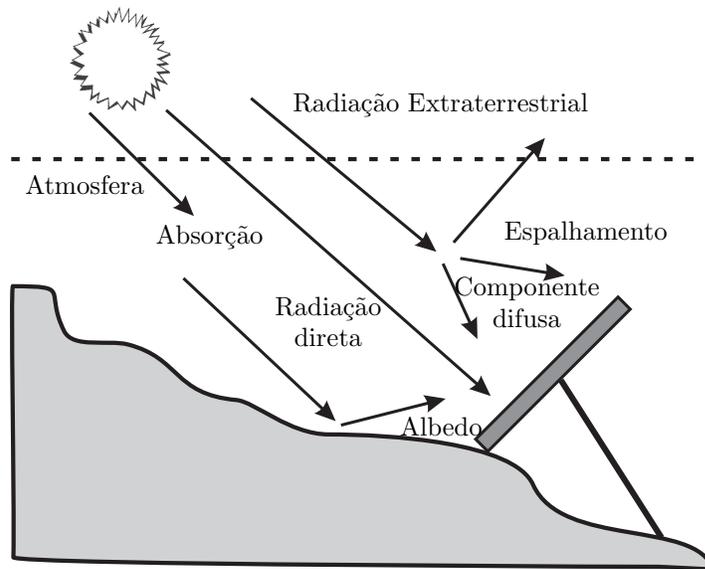


Figura 2.12: Radiação solar na atmosfera

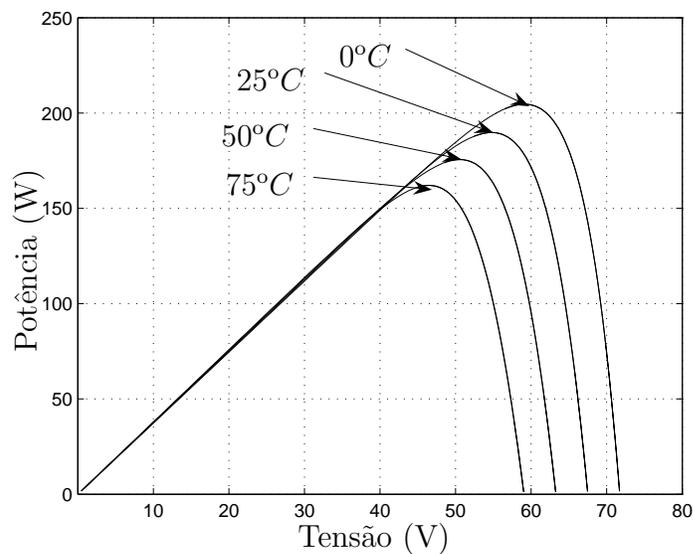


Figura 2.13: Característica $P \times V$ obtida para diferentes níveis de temperatura

efeito das altas temperaturas.

2.2.4 Perdas nas Células solares

A característica $I \times V$ ideal de um painel solar seria um retângulo, é possível notar também que a máxima potência de saída é representada pela área do maior retângulo

que pode ser desenhado no interior da curva. A razão entre a área deste retângulo e o produto $V_{oc} \cdot I_{sc}$ é definido como *fill factor* (FF) ou fator de preenchimento.

$$FF = \frac{V_{MPP}I_{MPP}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (2.10)$$

Então, eficiência da célula será

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{INC}} \quad (2.11)$$

sendo P_{INC} a potência solar incidente na célula. Assim, a maneira de se maximizar a eficiência da célula é maximizar o produto $V_{oc}I_{sc}FF$. A seguir uma descrição dos fatores que levam à redução do rendimento das células solares:

Perdas fundamentais Conforme observado na Seção 2.2.2 parte da energia contida nos fótons é utilizada para gerar portadores e boa parte é dissipada na forma de calor. Além disso, considerável parte do espectro luminoso não é utilizado por causa da incapacidade do semicondutor em absorver luz de determinada frequência. Esta incapacidade é melhorada utilizando estruturas de semicondutores diferente sobrepostas, fazendo que a camada inferior absorva parte da radiação que a camada superior não foi capaz de absorver. Há atualmente em laboratórios dispositivos operando com eficiência acima de 30%.

Recombinação O processo contrário ao de geração de portadores é a recombinação, quando o elétron se encontra com uma lacuna. A recombinação é mais comum nas impurezas ou nas falhas da estrutura do cristal onde níveis de energia podem ser introduzidos dentro do *gap* de energia (região entre o topo da banda de valência e a base da banda de condução, conhecida também como banda proibida), estes níveis agem como degraus para os elétrons caírem para a banda de valência e se recombinarem com as lacunas. Nos contatos ôhmicos do metal com o semicondutor também ocorre bastante recombinação. Uma solução utilizada nas células de alta eficiência é proteger os contatos com uma camada de semicondutor altamente dopada que age como espelho “refletindo” os portadores minoritários.

Resistência série A transmissão de corrente elétrica produzida pela célula solar envolve perdas ôhmicas. Estas perdas podem ser agrupadas e incluídas como uma resistência no circuito equivalente conforme mostrado na Figura 2.7 . Nota-se que a resistência série afeta a operação da célula principalmente diminuindo o FF.

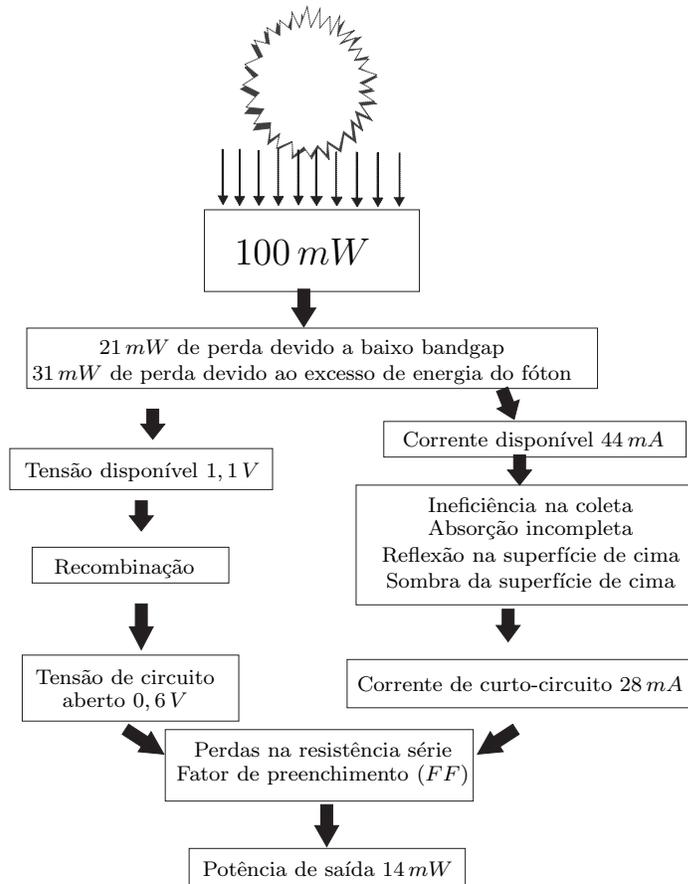


Figura 2.14: Sumário das perdas numa célula solar. Fonte: Markvart (2000)

As perdas fundamentais reduzem a eficiência teórica máxima da célula solar em até 48%. Perdas adicionais de tensão (36%), de corrente (10%), e perdas associadas com o FF (20%) justificam a eficiência em torno 23% para a melhor célula de silício atual.

As perdas apresentadas estão sumarizadas na Figura 2.14. Células solares com eficiência maiores têm sido obtida sob luz solar concentrada, em dispositivos feitos a partir de outros materiais ou em estruturas sobrepostas. Células de silício comuns possuem eficiência em torno de 14%. Entretanto, novos produtos com eficiência de 18% começam a aparecer no mercado (Markvart, 2000), (Schwartz, 1993) e (Szlufcik et al., 1997).

2.2.5 Tipos de células fotovoltaicas

Os principais tipos de painéis solares existentes são descritos a seguir:

Silício Cristalino É a tecnologia atualmente mais empregada e possui cerca de 95% de participação no mercado.

(i) **Silício Monocristalino** Este tipo de célula é evolução direta das células do Bell Labs. São feitas de finos *wafers* cortados de um simples cristal de silício grande. Os produtos comerciais deste tipo apresentam eficiência média de 12%.

(ii) **Silício Policristalino** Esta é composta de *wafers* contendo muitos cristais de silício unidos, fazendo-a menos eficiente, porém apresenta um menor custo de produção.

Filme fino de silício Esta é uma nova tecnologia que promete grande redução de custo dos painéis através da redução de material e energia utilizados durante o processo de criação. Apesar desta tecnologia produzir painéis menos eficientes, o apelo pela comercialização de painéis solares de baixo custo é o que impulsiona a sua produção.

Arsenato de Gálio (AsGa) - Com eficiência de 28%, é o que há de mais avançado na produção de painéis solares, porém sua construção é de alto custo dificultando o uso comercial. Seu emprego tem se limitado a aplicações espaciais.

Capítulo 3

Máxima Transferência de Potência

O baixo rendimento dos painéis solares é um dos principais fatores que têm limitado a sua utilização. No entanto, há uma busca contínua em se melhorar esta eficiência por diversos caminhos. Um deles é utilizar novos materiais na sua construção; outro é fazer o painel operar sempre no seu ponto de máxima eficiência, o MPP. Esta segunda alternativa é o objeto principal de estudo deste capítulo. A melhora do rendimento de painéis solares pode ser feita maximizando a radiação direta, através de lentes concentradoras ou movendo o painel conforme a posição do Sol. Outra técnica utilizada é rastrear o MPP, os métodos comumente utilizados são: perturbar e observar, condutância incremental, fração da corrente de curto-circuito e fração da tensão de circuito aberto. Apresenta-se as características de várias técnicas de rastreamento levando-se em consideração o custo de implementação, esforço computacional, precisão e complexidade.

3.1 Maximização da radiação direta



Quando a radiação solar penetra na atmosfera da Terra uma parte da energia incidente é removida pelas moléculas do ar, pelas nuvens e particularmente por materiais conhecidos por aerossóis. Essa remoção é feita por dispersão ou por absorção. A radiação que

alcança a superfície diretamente em linha reta sem ser refletida ou dispersada

é chamada de radiação direta.

E a radiação dispersada que alcança o solo é chamada de radiação difusa. Há também uma terceira componente, que é aquela radiação que alcança o receptor após uma reflexão no solo, que é conhecida como albedo. As três componentes formam a radiação global (Markvart, 2000). Para se maximizar a radiação direta incidente na placa solar existem basicamente dois métodos:

Mecanismos de movimento do painel (Sun tracker) - Em geral, sistemas como o da Figura 3.1 utilizam motores para posicionar o painel de maneira que a radiação direta incidente seja maximizada, isto acontece quando a radiação direta incide perpendicularmente na placa. O uso deste sistema aumenta bastante a potência disponível ao longo do dia. No entanto, sistemas contendo partes que se movem estão sujeitos a problemas de desgaste e necessitam de manutenção com maior frequência, além de incluir um componente a mais no custo do sistema.

Lentes concentradoras de radiação - Neste método a radiação incidente em uma área maior é concentrada em uma área menor por meio de uma lente. O uso de lentes concentradoras reduz o número de células necessárias para uma mesma demanda de potência. Pois as lentes conseguem coletar radiação de uma área maior e direcionar numa área menor. Tem-se obtido até 34% de eficiência utilizando concentração de luminosidade de 100 vezes. Algumas desvantagens têm dificultado consideravelmente a penetração destes sistemas no mercado:

- Os concentradores utilizam a radiação direta, sendo que seria mais proveitoso a sua utilização em locais onde haja maior quantidade de radiação direta. E mesmo para um dia sem nuvens a radiação difusa corresponde de 15-30% da luminosidade.
- Os concentradores sempre teriam que estar alinhados ao Sol e dependeriam de um *sun tracker*. Devido a essa complexidade adicional sua utilização em áreas remotas tem se mostrado inviável, pois reduz a confiabilidade e aumenta a necessidade de manutenção.

3.2 Busca do Ponto de Operação de Máxima Transferência de Potência

Se comparada com outras fontes geradoras de energia elétrica, a eficiência da conversão da energia fotovoltaica ainda é muito baixa. A potência de saída de um painel fotovoltaico sofre a influência da temperatura e da intensidade de radiação, e como as condições dessas variáveis não são sempre favoráveis, um mecanismo de controle que procure aproveitar ao máximo a potência que está disponível precisa ser utilizado.

3.2.1 Métodos de busca do MPP

O baixo rendimento da conversão de energia solar em energia elétrica fez com que fossem desenvolvidas diversas técnicas de maximização deste rendimento. As técnicas de maximização da potência disponível são muitas (Esrám e Chapman, 2007; Hua e Shen, 1998; Bekker e Beukes, 2004) e algumas delas são destacadas a seguir:

Perturbar e Observar (Jung, So, Y. e Choi, 2005) Este método envolve a perturbação do ponto de operação do painel solar, variando o consumo de potência da carga e monitorando se houve aumento ou diminuição de potência. Isto geralmente é feito variando-se a largura de pulso do conversor DC-DC ou do inversor. É bastante conhecido como *Hill Climbing*, pois seria como uma subida ao pico de potência que pode ser visto observando-se a curva potência *versus* tensão.

Este método não alcança o MPP com precisão e sim oscila em torno deste. O passo da perturbação é determinante na velocidade do rastreamento e na precisão, devendo-se estabelecer um compromisso entre os critérios. Algumas melhoras a este método, vêm sendo apresentadas, como exemplo, uma técnica de ajuste dinâmico do passo da perturbação, devendo este ser maior quando longe do ponto de operação e menor em torno deste. Geralmente, este método exige um sensor de tensão e um de corrente e pode ter problemas com variações súbitas das condições de radiação. Em (Jung et al., 2005) o efeito das variações súbitas é minimizado.

Condutância incremental Este método se baseia no fato de que a derivada da potência de saída do painel é zero no MPP, positiva à esquerda e negativa à direita Fi-

gura 2.13. No MPP a derivada da potência é nula, logo:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \simeq I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (3.1)$$

O resultado da Equação 3.1 mostra que comparando-se a condutância instantânea I/V , encontrada a partir das medições de tensão e corrente do painel, com a condutância incremental $(\Delta I/\Delta V)$ é possível chegar no MPP.

As medidas instantâneas da corrente e da tensão requerem dois sensores para implementação do algoritmo.

DC-Link Capacitor droop control Este método monitora o valor da tensão do link DC de maneira que ela não diminua à valores considerados instáveis o que levaria a tensão do painel ao colapso.

Fração da tensão de circuito aberto Baseia-se no fato de que a tensão no MPP V_{MPP} pode ser considerada proporcional à tensão de circuito aberto do painel V_{OC} . Podendo assim, desligar momentaneamente o conversor DC-DC e medir V_{OC} e, utilizando a relação $V_{MPP} = k_v \cdot V_{OC}$, estimar o valor da tensão de trabalho ótima. Saliente-se que a constante k_v tem um valor diferente para cada modelo de placa, assim este método só tem bom desempenho se todas as placas do sistema de geração forem idênticas.

Fração da corrente de curto-circuito Este utiliza a característica linear existente entre a corrente de curto circuito do painel I_{cc} e a radiação. Logo medindo-se a corrente de curto circuito é possível obter a corrente no MPP como uma fração da corrente de curto circuito (Yuvarajan e Xu, 2003). I_{cc} é obtido curto circuitando os terminais do painel solar e mantido durante o tempo necessário para se fazer a medição. A corrente de máxima eficiência é dada por $I_{MPP} = k_i \cdot I_{cc}$. Este trabalho faz uso deste método de busca do ponto ótimo.

Muitos algoritmos utilizados para fazer o rastreamento requerem um microprocessador e sensores de corrente e de tensão para o cálculo da potência elétrica do painel solar, o que torna cara a sua implementação. Estes métodos apresentam uma velocidade de convergência maior, o erro de busca do MPP é menor e alguns desses métodos independem do tipo de painel solar, porém possuem velocidade de controle baixa e configuração do circuito de controle complexa (Solodovnik, Liu e Dougal, 2004) (Tan, Green e Hernandez-Aramburo, 2005)(Shimizu, Hashimoto e Kimura, 2003).

Existem alguns outros métodos que tornam a implementação do rastreamento mais simples e econômica como pode ser visto em Pan, Chen, Chu e Huang (1999) que se baseia na solução gráfica de duas equações algébricas para se encontrar o MPP através de um simples controlador PI.

Kobayashi, Matsuo e Sekine (2006a) propõem uma alternativa mais barata que é a utilização de um diodo de junção P-N para gerar a tensão de referência do ponto de operação do painel solar, permitindo o rastreamento do MPP com erro pequeno, já que esta tensão tem relação com a temperatura do painel solar (Yu, 2004) (Kobayashi, Matsuo e Sekine, 2006b). Foi mostrado, por meio de experimentos, que em painéis de cristal de silício com potência de 150 W há uma compensação da variação das características de saída em relação à intensidade luminosa. O uso da junção P-N dispensa o uso de sensores de tensão e corrente além de algoritmos complexos para o cálculo da potência.

Capítulo 4

Sistema de Bombeamento Fotovoltaico

Os dois locais mais comuns para o uso de geradores elétricos solares são o espaço (em satélites e estações de pesquisas espaciais) e em localidades isoladas. Nestas últimas, a utilização mais usual tem sido em sistemas de bombeamento d'água, que é uma das poucas situações em que a energia solar fotovoltaica é técnico-economicamente viável. Entretanto, os sistemas de geração de eletricidade solar têm baixo rendimento, como destacado no capítulo anterior, e qualquer contribuição que torne os sistemas de bombeamento d'água mais eficientes é de interesse das instituições que desejam levar desenvolvimento a comunidades em regiões remotas. Sistemas de bombeamento utilizando energia solar são uma das mais importantes aplicações da energia fotovoltaica. O sistema composto de MI trifásico é mais confiável, robusto e de baixo custo. O inversor de frequência permite o funcionamento do sistema com velocidade variável, e através da modulação SVM é possível reduzir conteúdo harmônico e utilizar melhor o link CC. As bombas utilizadas podem ser cinéticas (ex. Bomba centrífuga) ou de deslocamento positivo (ex. Bomba de engrenagem, helicoidal e de pistão). O uso das bombas de deslocamento positivo é indicado para aplicações onde o volume bombeado deve ser medido com precisão.

4.1 Introdução aos sistemas de bombeamento

Sistemas de bombeamento em localidades isoladas que utilizam motores acionados por energia fotovoltaica tem aparecido como uma promissora aplicação de energia renovável em regiões onde a concessionária de energia elétrica não atende. Isso porque é de fácil instalação e alta confiabilidade, embora ainda existam fatores que dificultam a sua utilização mais intensa, como o alto custo de instalação e a resistência em se utilizar um sistema novo, já que por muitos anos se utilizou moinhos de vento, motores movidos a óleo diesel, processos manuais e etc.

Em Meah, Fletcher e Ula (2006) e em Mahmoud (1990) são feitas comparações entre os custos efetivos de implantação de um sistema de bombeamento de água para áreas isoladas utilizando a rede de distribuição de energia elétrica convencional, geradores elétricos movidos por motores a diesel e também geradores fotovoltaicos. É demonstrado que este último é a opção de menor custo se o horizonte de análise é longo(acima de quatro anos), além de provocar menos impactos ao ambiente.

Um grande problema em sistemas fotovoltaicos é o casamento adequado do gerador às cargas eletromecânicas, isto se deve às não-linearidades, dinâmica do nível de radiação, dependência da tensão e corrente em relação à temperatura da célula solar, etc. Este problema, anteriormente apresentado na Seção 2.2.3, geralmente é resolvido utilizando um conversor CC-CC entre o módulo solar e a carga. Com esta configuração o conversor funcionaria como carga para o módulo solar e este poderia trabalhar no MPP mediante ajuste da tensão de entrada do conversor controlando o ciclo de trabalho das chaves.

É importante considerar que a aplicação destes sistemas em países em desenvolvimento exige que o custo total seja baixo e que a manutenção possa ser feita por pessoal com qualificação técnica básica. Por esta razão é mais adequado o uso de uma estrutura modular com peças de substituição disponíveis no mercado local, além de oferecer treinamento de pessoal para manutenção e para o uso adequado. O sistema composto de conversor CC-CC com rastreamento do MPP e inversor têm demonstrado confiabilidade. Alguns sistemas utilizam o inversor para fazer o rastreamento do MPP (Chen, Smedley, Vacher e Brouwer, 2003) (Muljadi, 1997).

Maiores detalhes sobre os sistemas bombeamento, mostrando sua evolução, as falhas mais usuais e as suas potencialidades são encontradas em Short e Mueller (2002).

4.2 Inversor de Frequência

O inversor é o equipamento responsável por transformar a eletricidade de CC para CA. Há dois tipos: o fonte de corrente e o fonte de tensão. O primeiro deles transforma corrente CC em CA, com amplitude e frequência variáveis e independentes uma da outra; este inversor é raramente utilizado, pois é caro. O segundo tipo é o fonte de tensão, responsável por transformar uma tensão CC em CA, com amplitude e frequência variáveis e independentes uma da outra. O emprego do inversor em sistemas fotovoltaicos torna o uso de energia elétrica solar mais prático, já que a grande maioria dos equipamentos elétricos são acionados por corrente CA. O inversor também tem a função de desconectar o circuito para protegê-lo de surtos de potência, e de rastrear o MPP para manter a geração de potência tão eficiente quanto possível (isto será detalhado nas seções subsequentes).

Estes inversores que operam em modo autônomo idealmente devem atender a algumas exigências:

- Tensão de saída senoidal e regulada;
- Tensão e corrente dentro dos limites estabelecidos;
- Cabeamento que suporte variações na tensão de entrada;
- Injeção de harmônicos reduzida afim de não prejudicar componentes eletrônicos e evitar aquecimento desnecessário;
- Habilidade de suportar sobrecargas de tempo curto, resultado de partidas de motores;
- Circuitos de proteção contra curtos e quedas de tensão e frequência;
- Baixa perda de carga;
- Baixo ruído audível (frequências acima de 22 KHz) e de RF.

As chaves semicondutoras do inversor são comandadas de acordo com critérios que priorizem a menor geração de harmônicos, menor quantidade de chaveamentos ou outros critérios. Basicamente existem três técnicas de chaveamento comumente utilizadas: onda quadrada, onda quase quadrada e modulação por largura de pulso

(PWM). Ondas quadradas e quase quadradas podem alimentar ferramentas de potência, aquecedores e lâmpadas incandescentes, pois estes não necessitam de onda senoidal perfeita. Já algumas aplicações domésticas, necessitam de tensão com forma de onda senoidal fazendo com que os inversores operem com modulação PWM.

A técnica de modulação baseada em vetores espaciais ou *Space Vector Modulation* (SVM) consegue aproveitar até 15% a mais do link CC se comparada ao PWM senoidal triangular. Por já ser uma técnica amplamente utilizada e facilmente implementada em microcontroladores e DSPs o sistema proposto faz uso do SVM para o chaveamento do inversor trifásico.

4.3 Bombas Hidráulicas

As bombas são muito utilizadas em aplicações residenciais e industriais, sendo muitos os tipos, tamanho e materiais com os quais são feitas. Há materiais para aplicações corrosivas, técnicas de vedação eficientes, melhoras na capacidade de funcionamento a vazio.

As bombas são divididas em dois tipos fundamentais baseados na maneira em que elas transmitem a energia ao fluido.

Deslocamento cinético Este tipo de bomba utiliza a força centrífuga do elemento rotativo, conhecido como impelidor, que transfere energia cinética para o fluido. A energia é fornecida à água sob forma de velocidade e converte-se dentro da bomba em energia de pressão. Um exemplo comum são as bombas centrífugas, Figura 4.1(a), nelas o líquido penetra no rotor paralelamente ao eixo, sendo dirigido pelas pás para a periferia seguindo trajetórias contidas em planos normais ao eixo. O fluido é impelido pela força centrífuga criada pelo rotor e sai com velocidade e pressão maiores do que quando entra. Este tipo de bomba é geralmente utilizado para baixas pressões e grandes vazões.

Deslocamento positivo São bombas que após a rotação de seu eixo, desloca um volume fixo de fluido. As bombas de deslocamento positivo são indicadas em casos onde se requer vazão constante independente de variação da carga. É mais indicada para aplicações onde o volume bombeado deve ser medido com precisão. Um exemplo deste tipo de bomba é a do tipo de engrenagens; nela o fluido bombeado

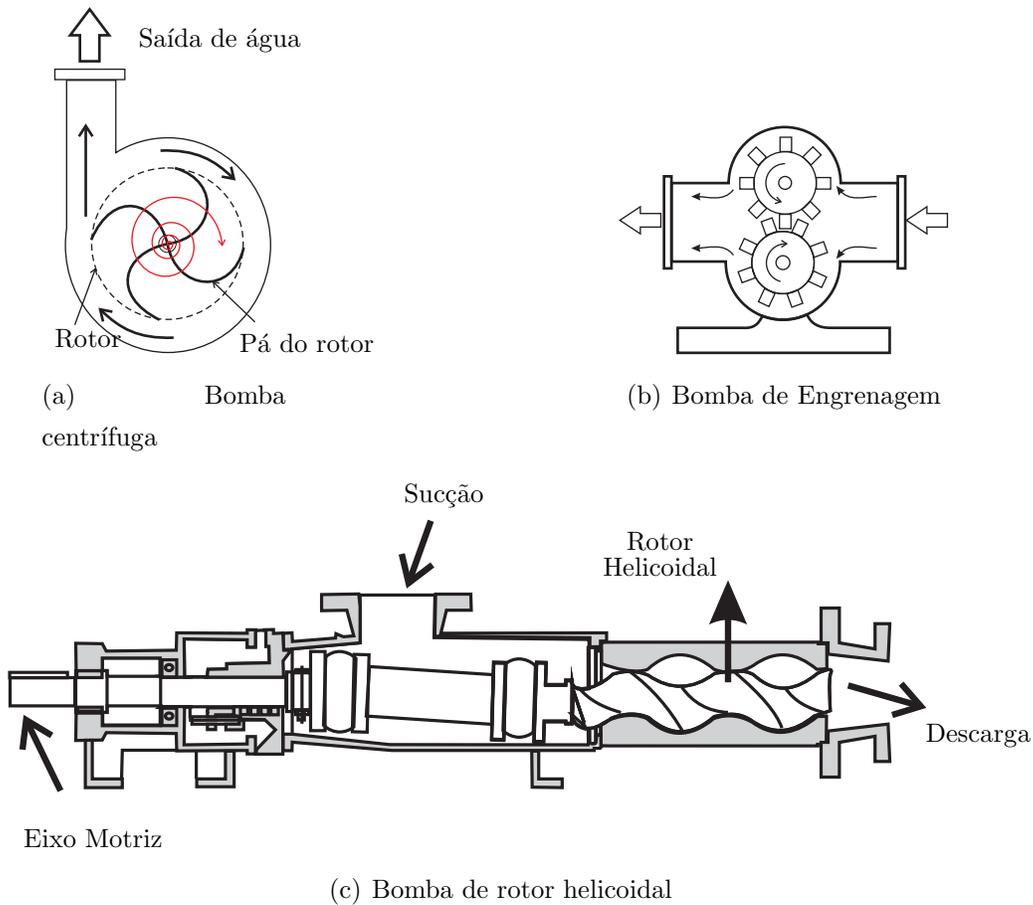


Figura 4.1: Esquema de bombas

é empurrado pelos dentes das engrenagens, resultando numa vazão proporcional ao volume entre os dentes e à velocidade das engrenagens, sendo uma delas acionadas por um motor ver Figura 4.1(b). Este tipo de bomba é mais utilizada em líquidos lubrificantes. O tipo de bomba muito utilizado para bombeamento fotovoltaico em poços artesianos são as bombas helicoidais (cavidades progressivas), Figura 4.1(c).

Há três tipos de sistema de bombeamento de água: submersível, superficial e flutuante. O submersível bombeia água de fontes profundas, o sistema superficial bombeia água da superfície das fontes, seja tanques, rios e lagos, e o sistema com bomba flutuante bombeia água dos reservatórios tendo a possibilidade de ajuste da altura.

Em sistemas de bombeamento o componente que tende a apresentar mais defeito é a bomba. Segundo Meah et al. (2006) antes de 2002, esses sistemas geralmente operavam com bombas a diafragma. Pequenas partes dinâmicas e diafragmas no interior das

bombas submersas falhavam com frequência, levando a custos de manutenção maiores do que o esperado. Além disso, a maioria dos sistemas utilizavam motores CC para acionar a bomba, isto adicionava mais custo de manutenção para a troca das escovas a cada 2-3 anos. Com a chegada no mercado de bombas com rotor helicoidal e os motores de indução os problemas de manutenção diminuiriam.

Um problema que pode ocorrer com frequência em bombas é a cavitação. Este fenômeno ocorre quando cavidades pequenas ou grandes são geradas em um fluido que se expande e rapidamente se contrai, produzindo um som agudo. Cavitação ocorre em bombas, propulsores, impelidores etc. Um líquido, quando está submetido a uma baixa pressão inferior a um limite, rompe e forma cavidades de vapor. O ruído criado por cavitação é um problema particular em bombas. O colapso das cavidades envolve energias muito altas, e pode causar danos maiores, ocasionando desgastes nos componentes reduzindo drasticamente o tempo de vida da bomba (Kaya, Yagmur, Yigit, Kilic, Eren e Celik, 2008).

4.4 Motores elétricos

Para acionamento das bombas emprega-se como dispositivo de conversão eletromecânica motores elétricos do tipo CC ou de indução fabricados com rotor em gaiola de esquilo. As principais desvantagens técnicas do motor CC são a necessidade de manutenção devido ao desgaste das escovas e o seu alto custo. Já o motor de indução (MI) apresenta como desvantagem uma característica torque \times velocidade não-linear exigindo algoritmos de controle mais sofisticados que os exigidos pelos motores CC. O MI para operar com velocidade variável necessita de um componente adicional, que é o inversor de frequência, responsável pela conversão da energia elétrica CC, proveniente do painel solar, para energia elétrica CA trifásica que alimenta o motor de indução. Apesar das desvantagens e do custo adicional do inversor, a utilização do motor de indução se apresenta mais vantajoso em relação a motores CC pois agrega robustez e confiabilidade. Uma outra característica do MI é que com a tecnologia de projeto e fabricação atuais um MI de mesma potência que um motor CC tem menores volume e peso, o que facilita no caso da colocação de um sistema motor-bomba em um poço profundo.

Capítulo 5

Descrição e Resultados das Simulações

O sistema de bombeamento empregando energia fotovoltaica apresenta algumas exigências que irão definir detalhes do projeto, como, por exemplo, o número de placas solares, potência nominal do motor de indução, etc. Adicionalmente, os parâmetros destes dispositivos precisam ser conhecidos para que simulação possa ser realizada. Detalhes a respeito de dimensionamentos e modelagens para simulações são dados neste capítulo.

5.1 Sistema completo

A Figura 5.1 mostra um sistema de bombeamento de água empregando a radiação solar como fonte primária de energia. O sistema é composto de uma bomba que é acionada por um motor de indução trifásico de 3 cv (2208 W) com 380 V em Y. Para alimentar este motor utiliza-se um inversor de potência trifásico em ponte completa que idealmente entregaria tensões senoidais trifásicas; na prática além da componente fundamental há harmônicas de tensão, entretanto, a corrente tem forma aproximadamente senoidal, pois as bobinas do motor funcionam como filtros para as componentes harmônicas mais elevadas de corrente. Nas simulações o motor aciona uma bomba centrífuga cuja potência instantânea é dada por:

$$P = K \cdot w^3 \tag{5.1}$$

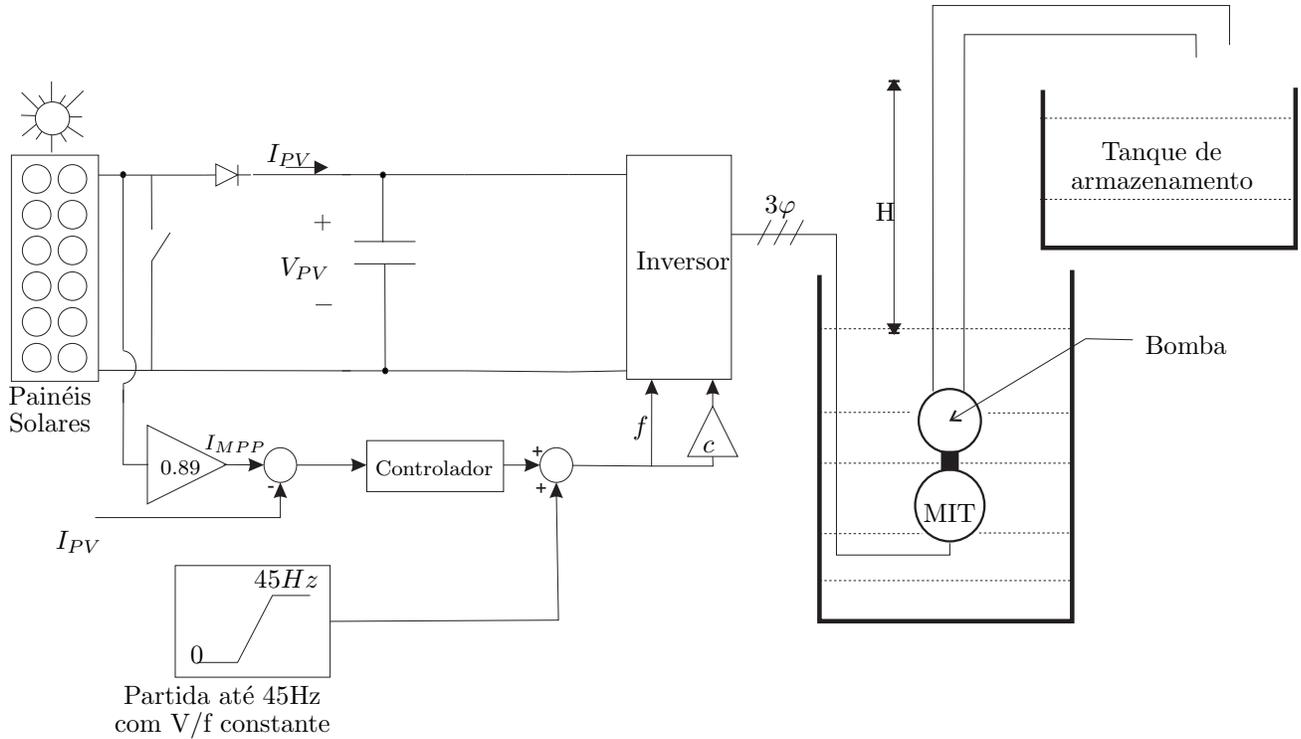


Figura 5.1: Sistema de bombeamento fotovoltaico

ou ainda, o torque instantâneo da bomba é

$$T = K \cdot \omega^2 \quad (5.2)$$

O valor de tensão exigido no barramento CC que alimenta o inversor (ver Figura 5.1) é definido pelo valor da tensão alternada solicitada para o motor operar nos valores nominais e pelo tipo de modulação empregado. Para o sistema em estudo utilizou-se a modulação por vetores espaciais (SVM), desta maneira, a tensão no barramento CC deve ser:

$$V_{cc} = \sqrt{2} \cdot V_{ac-rms} \quad (5.3)$$

o que resulta num barramento CC de aproximadamente 540V. Observe que esta é a condição ideal para se obter 380V, mas as simulações realizadas mostram que o valor da tensão no barramento CC varia de acordo com a carga e com a luminosidade.

Utilizando os parâmetros de placa do motor de indução chega-se à seguinte necessidade de potência elétrica de entrada na máquina:

$$V_a = \sqrt{3} \cdot V_{ac} \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 4.86 \simeq 3200W \quad (5.4)$$

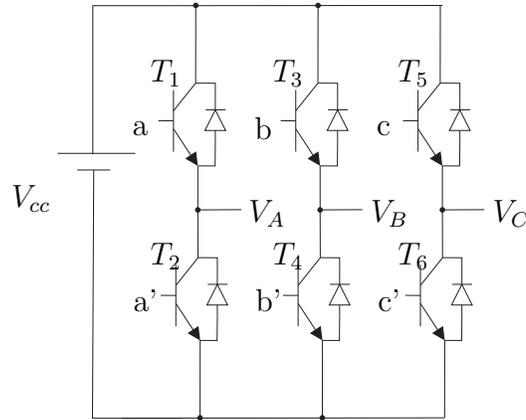


Figura 5.2: Inversor trifásico em ponte completa

Desprezando-se a perda de potência no inversor, chega-se a uma necessidade de potência dada pela Equação 5.4 a ser fornecida pelo arranjo de painéis. O arranjo das células no módulo fotovoltaico irão definir o valor da tensão e da corrente que este poderá fornecer ao sistema, sendo que arranjos em série elevam o nível de tensão e arranjos em paralelo elevam o nível de corrente.

Para o sistema em estudo utilizou-se 18 painéis solares de 190 W resultando num total de 3420 W, sendo 2 grupos, compostos de 9 painéis em série como na Figura 5.3. O arranjo é formado por painéis HIP-190BA3 da Sanyo, cujas características elétricas foram obtidas em simulação na Seção 2.2.3. A Figura 5.5 mostra as características elétricas do arranjo.

Os diodos de “bypass” podem ser incorporados ao arranjo para evitar que alguns painéis do arranjo operem como carga para outros que operam como geradores (por estarem sob forte luminosidade ou por serem mais eficientes). Quando há uma sombra sobre um painel do arranjo, este não poderá dar continuidade à corrente dos demais módulos, pois estará funcionando como carga para os outros. Assim o diodo de “bypass” é utilizado para oferecer um caminho de baixa resistência à corrente dos painéis geradores minimizando as perdas no painel que esteja operando como carga. Além disso, os painéis solares não são exatamente iguais

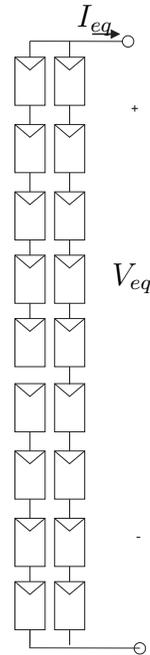


Figura 5.3: Arranjo série/paralelo de 18 módulos solares

e isso faz com que o pior painel acabe operando como carga, nesta condição o painel aquece demasiadamente comprometendo a estrutura do encapsulamento e degradando o desempenho, isto é conhecido como a formação de manchas quentes (*hot-spot*) nos arranjos de painéis solares. Neste trabalho não é considerado o efeito de sombra no arranjo de painéis e todos são considerados iguais.

A intensidade de radiação incidente em cada painel é igual para todos durante a simulação do sistema, mesmo durante as mudanças de condição. O mesmo arranjo da Figura 5.3 pode ser visto na Figura 5.4 com os respectivos diodos de “bypass”.

5.1.1 Operação no MPP empregando a corrente de curto-circuito dos painéis

A chave controlada efetua curto-circuitos periódicos nos terminais dos painéis solares, para que se faça a medição da corrente de curto-circuito I_{sc} . O valor de corrente do painel que o faz operar no ponto de máxima potência segundo Yuvarajan e Xu (2003) é dado por:

$$I_{MPP} = 0,89 \cdot I_{sc} \quad (5.5)$$

É importante lembrar que este valor é aproximado, podendo ser encontrado, para outras placas solares, valores diferentes que permitam melhor desempenho.

O objetivo do sistema de controle é fazer com que as placas solares operem sempre no valor de corrente I_{MPP} ; para isto um controlador é utilizado, de maneira que zere o erro entre o valor da corrente de referência (I_{MPP}) e o valor da corrente de saída do arranjo de painéis. Vê-se na Figura 5.1 que um valor de 45 Hz é adicionado para que a velocidade da máquina não diminua significativamente ainda que durante os transitórios. O sinal de frequência gerado é multiplicado pela constante V_n/f_n (obtida dos valores nominais do motor) para que seja encontrado o valor de tensão que deve ser aplicado ao motor. Esta técnica de controle permite acionar o motor com a relação V/f constante, o que mantém o fluxo magnético aproximadamente constante (o que garante torque aproximadamente nominal) quando o frequência elétrica

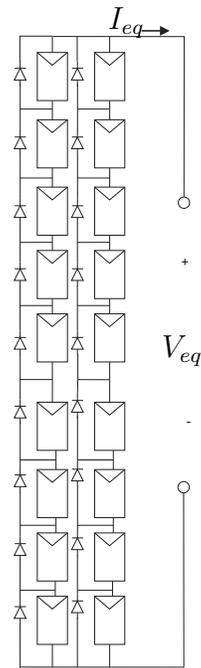


Figura 5.4: Arranjo série/paralelo de 18 módulos solares com diodos by pass

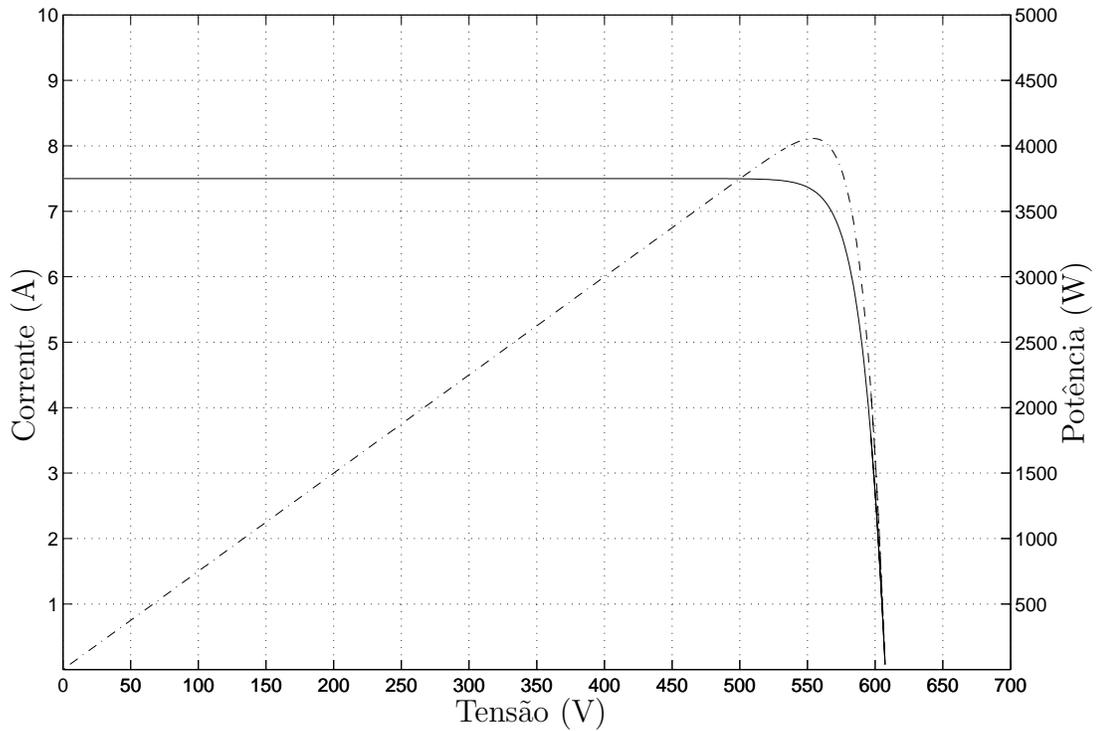


Figura 5.5: Característica elétrica de um arranjo de 18 módulos solares HIP-190BA3 sendo $G_a = G_{as}$ e $T = T_s$

é elevada (que é o presente caso, já que com frequências baixas a bomba cavitaria). Encontrados os valores de tensão e frequência que devem ser aplicados aos terminais do estator, o passo seguinte é empregar o algoritmo de modulação por vetores espaciais para gerar as sequências de chaveamento das chaves do inversor.

Conforme mostrado na Figura 5.1, o sistema parte acionado por uma rampa, com valores de tensão e frequência tais que $V/f = V_n/f_n$. Após atingir o regime permanente o sistema de controle é ligado.

5.2 Dados dos dispositivos simulados

5.2.1 Característica do painel solar simulado

A característica elétrica do arranjo de painéis solares é mostrada na Figura 5.5.

5.2.2 Motor - Bomba

Os parâmetros elétricos e mecânicos do MIT são:

- Resistência do estator R_s de $2,65 \Omega$
- Indutância de dispersão do estator L_{ls} de $9,95862 mH$
- Resistência do rotor R_r de $1,8755 \Omega$
- Indutância de dispersão do rotor L_{lr} de $9,95862 mH$
- Indutância Mútua L_m de $238,485 mH$
- Inércia do rotor J de $0,0058 (Kg.m^2)$

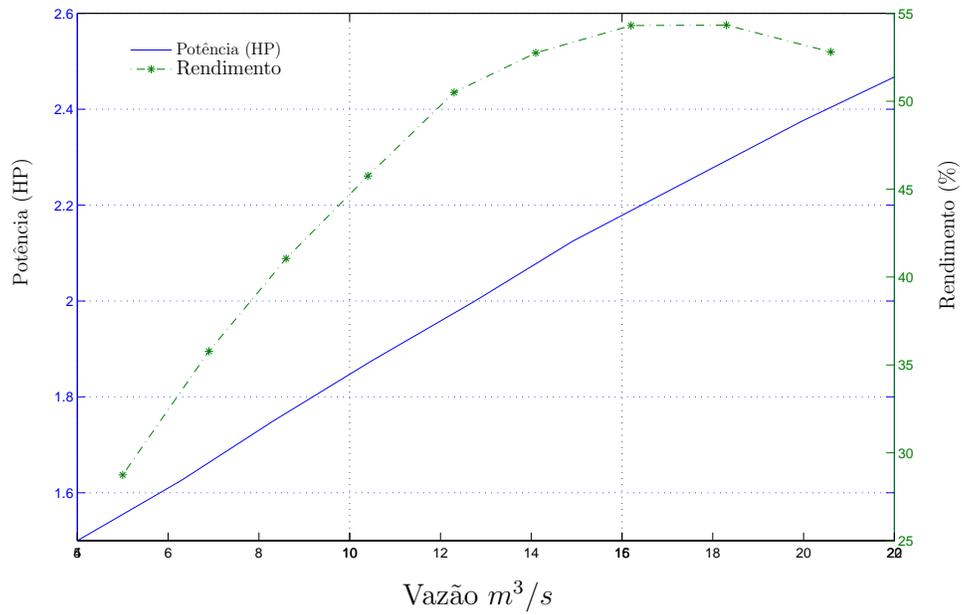
Os dados de placa são:

- Potência nominal de $3 HP$
- Tensão nominal $380 V/220 V (Y/\Delta)$
- Corrente nominal $4,86 A/8,6 A (Y/\Delta)$
- Velocidade nominal $1730 rpm$

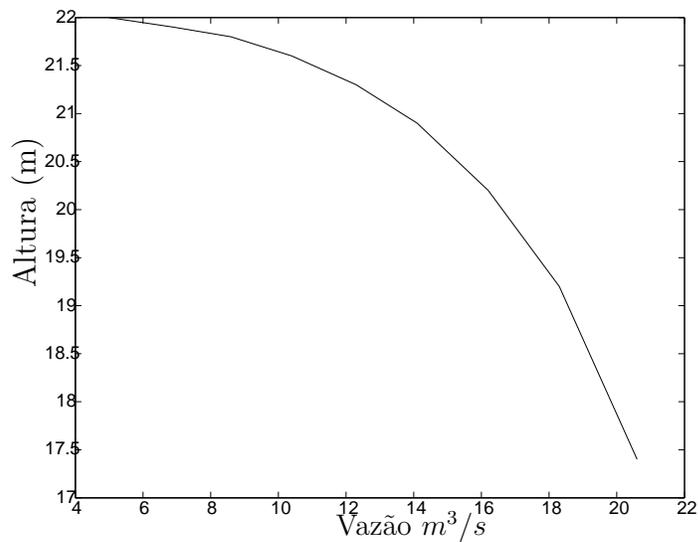
As características da bomba empregada são mostradas nos gráficos da Figura 5.6.

5.3 *Software* e outros parâmetros utilizados

Para implementar a simulação foi empregado o *software* Simulink/Matlab. O tempo de amostragem da simulação foi de $10 \mu s$. O curto-circuito nos terminais do sistema de placas solares era dado a cada $200 ms$, durante um tempo de $60 ms$. O controlador tem tempo de amostragem de $200 \mu s$. Dois tipos de controladores foram avaliados, o tradicional PI e o nebuloso; ambos são descritos nas seções a seguir.



(a)



(b)

Figura 5.6: Curvas características da bomba empregada nas simulações.

5.3.1 Controlador PI

O controlador proporcional-integral-derivativo (PID) é muito utilizado na indústria. O termo derivativo influencia mais fortemente a resposta transitória, que não era o foco principal deste trabalho; assim optou-se por simplificar o controlador usando apenas o PI. Para que a simulação fosse mais próxima das implementações reais empregou-se

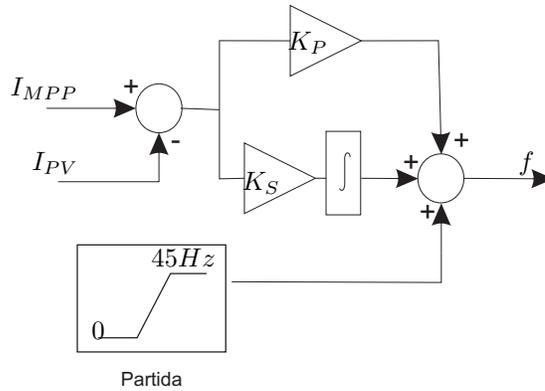


Figura 5.7: Controlador PI

o PI discreto, que no presente trabalho foi utilizado com uma taxa de amostragem de $T_{PI} = 200 \mu s$ e ganhos proporcional $K_P = 3$ e integral $K_I = 9$. O controlador utilizado tem como intuito zerar o erro entre a corrente de referência I_{MPP} e a corrente do painel I_{PV} . A corrente de referência é obtida a cada $200 ms$ através da multiplicação do valor da corrente de curto-circuito por um fator $K_i = 0,89$; como explicado na Seção 5.1.1 este valor é aproximadamente o valor da corrente no ponto de máxima eficiência. O controlador PI opera independente do modelo da planta, mas para sintonizar os parâmetros K_P e K_I testes podem ser realizados ou métodos analíticos como o *root locus* podem ser empregados (este utiliza o modelo da planta). Indêpende de como os ganhos foram obtidos o desempenho não é garantido se a faixa de operação da variável controlada é muito grande. A Figura 5.7 exibe o diagrama de blocos do controlador PI.

5.3.2 Controlador nebuloso

O controlador nebuloso, também chamado de *fuzzy* ou difuso, tem como característica principal o fato de poder utilizar a experiência do operador da planta e dados experimentais como meio para sintonia dos seus parâmetros. Um benefício adicional é que o mapeamento do controlador nebuloso é não-linear, assim ele consegue apresentar bom desempenho em largas faixas de variação da variável controlada, ainda que a planta seja não linear, que é o caso do painel solar. Os fundamentos e detalhes sobre o controlador nebuloso já são facilmente encontrados na literatura (Reznik, 1997; Pedricz e Gomide, 1998; Vas, 1999) e apenas uma breve revisão dos passos da implementação deste controlador são apresentados, para que o leitor identifique os parâmetros empregados nas simulações apresentadas neste capítulo. A Figura 5.8 exibe o diagrama de

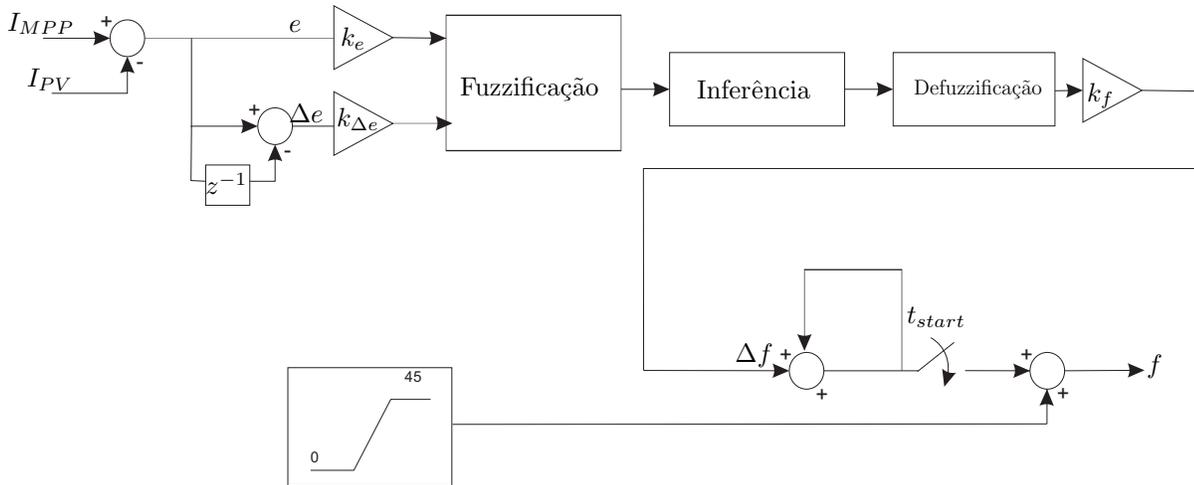


Figura 5.8: Controlador Fuzzy

blocos do controlador nebuloso. O t_{start} representa o instante em que o sistema de controle entra em funcionamento. O sistema parte com V/f constante e no momento que o sistema alcança 45Hz o controlador nebuloso passa a funcionar.

É necessário que o sistema rastreie um *set point* de maneira semelhante ao controlador PI, sendo que, para o controlador nebuloso há necessidade de duas variáveis de entrada: erro e a variação do erro.

O erro é dado por:

$$e(t) = I_{MPP} - I_{PV} \quad (5.6)$$

E a variação do erro:

$$\dot{e}(t) = e(t) - e(t') \quad (5.7)$$

Com $t' < t$ e $t' \rightarrow t$ ou seja a derivada do erro.

A variável de saída $f(t)$ do controlador será o incremento de frequência necessário para zerar o erro. Cada uma das variáveis $e(t)$, $\dot{e}(t)$ e $f(t)$ possuem uma faixa de operação característica e que é chamada de universo de discurso. Esta faixa de operação é normalizada e em seguida mapea-se os valores “crisp” (valores numéricos) da variável em termos de conjuntos nebulosos semelhantes ao exibidos nas Figuras 5.9 e 5.10.

Os conjuntos da Figura 5.9 representam a variável linguística E_n sendo a forma ne-

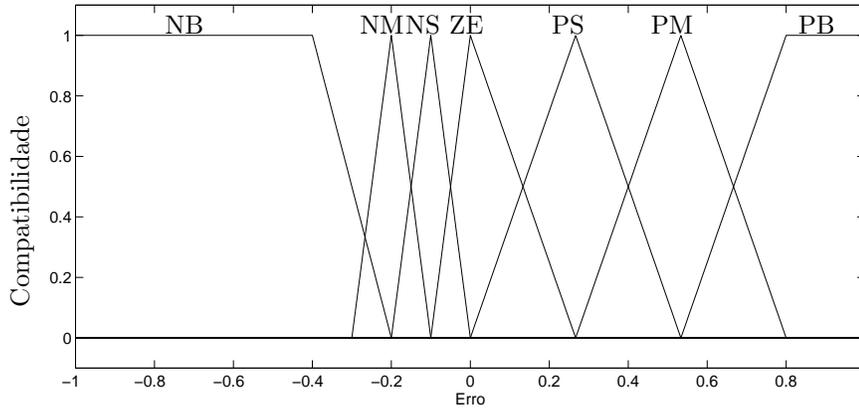


Figura 5.9: Conjuntos nebulosos da variável erro

bulosa da variável $e(t)$, os conjuntos da Figura 5.10 representam as variáveis linguísticas dE_m e F_q que representam a forma nebulosa das variáveis $\dot{e}(t)$ e $f(t)$ respectivamente. Existem diferentes curvas para representar os conjuntos: sigmoideal, gaussiana, triangular e trapezoidal são algumas das mais utilizadas (Reznik, 1997).

Neste trabalho considerou-se $n = m = q = 7$, fazendo com que cada variável possuía 7 conjuntos nebulosos representados por NB, NM, NS, ZE, PS, PM e PB (*Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Big*). Os conjuntos nebulosos da variável variação do erro ($\dot{e}(t)$) e frequência de saída ($f(t)$) são idênticos, já os conjuntos variável erro ($e(t)$) estão mais estreitas quando o erro é negativo; esta alteração faz com que o sistema seja mais reativo a variações quando o erro é negativo, evitando que o sistema se mantenha durante muito tempo com o erro negativo, pois esta situação ocorre quando os painéis solares não possuem a potência suficiente para manter o consumo atual do motor bomba.

Estabelecimento das Regras

Tendo os conjuntos definidos faz se necessário o estabelecimento de regras relacionando as entradas e a saída. Uma maneira de se obter as regras utilizando o conhecimento do operador é observando a resposta do sistema. Suponha que um sistema possui uma resposta como a exibida na Figura 5.11. Entre os instantes t_0 e t_1 da Figura 5.11 é possível observar que o sistema apresenta erro grande e pequena variação de erro. Ou seja $e(t) = PB$ e $\dot{e}(t) = PS$ baseado no conhecimento de controle é possível inferir que o controlador necessita de uma ação forte e positiva, logo $f(t) = PB$.

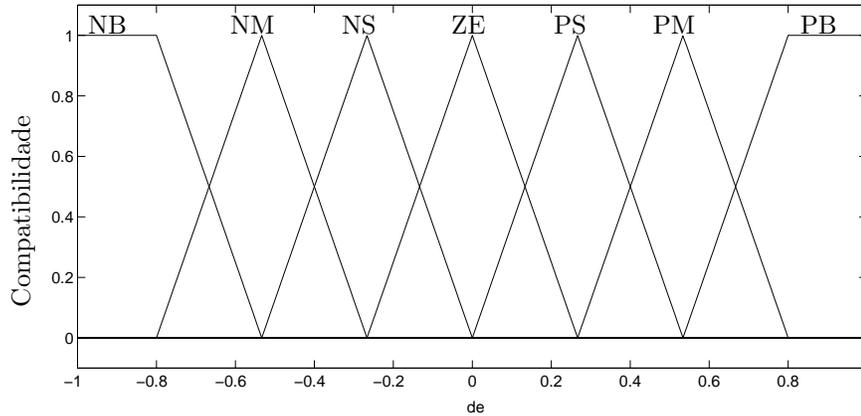


Figura 5.10: Conjuntos nebulosos da variação do erro e da saída

Outro trecho que pode ser analisado na Figura 5.11 é entre os instantes t_4 e t_5 em que se observa um “overshoot”. Nesta situação tem-se $e(t) = NB$ e $\dot{e}(t) = ZE$. Esta situação necessita de uma resposta forte e negativa, isto leva a $f(t) = NB$

Desta maneira é estabelecido um conjunto de regras do tipo IF THEN:

$$R1: \text{ IF } e = E_1 \text{ AND } de = DE_1 \text{ THEN } f(t) = F_1$$

$$R2: \text{ IF } e = E_2 \text{ AND } de = DE_2 \text{ THEN } f(t) = F_2$$

$$R3: \text{ IF } e = E_3 \text{ AND } de = DE_3 \text{ THEN } f(t) = F_3$$

$$\vdots = \quad \quad \quad \vdots = \quad \quad \quad \vdots = \quad \quad \quad \vdots$$

$$Rn: \text{ IF } e = E_n \text{ AND } de = DE_n \text{ THEN } f(t) = F_n$$

Estas regras são distribuídas na Tabela 5.1. A obtenção das demais regras é feita utilizando procedimento semelhante totalizando 49 regras. O processamento destas regras é conhecido na literatura como mecanismo de inferência ou máquina de inferência.

Cada regra é constituída de sua parte antecedente e consequente, a parte condicional ($IF e = E_1 \text{ AND } de = DE_1$) é conhecida como antecedente e a segunda parte ou o resultado da regra ($f(t) = F_1$) é conhecida como consequente.

Quando o controlador recebe um valor de entrada ele verifica o grau de compatibilidade de um valor Crisp com os conjuntos nebulosos, isto descreve o significado da parte antecedente. A partir deste significado encontra-se o conjunto nebuloso que representa a parte consequente.

É possível utilizar um número menor de regras, bastando reduzir a quantidade de conjuntos nebulosos utilizados para descrever cada variável linguística. É importante

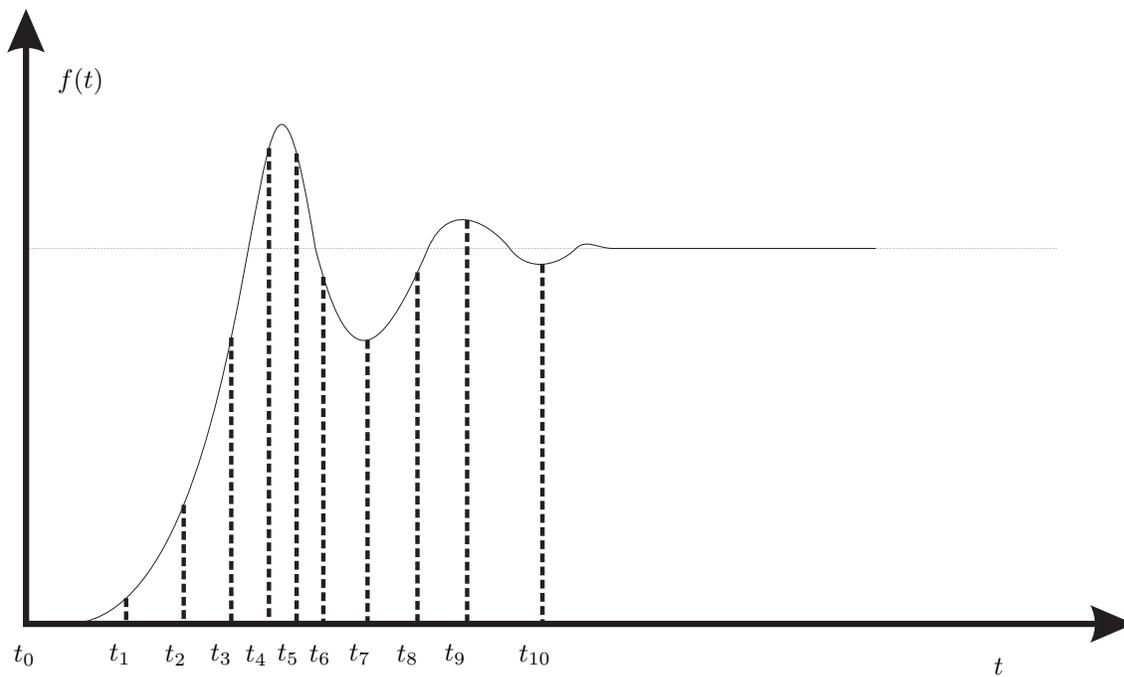


Figura 5.11: Resposta de um sistema dinâmico típico

Tabela 5.1: Tabela de regras do controlador fuzzy

$E \setminus dE$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	GP
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
Z	NB	NM	NM	ZE	PM	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

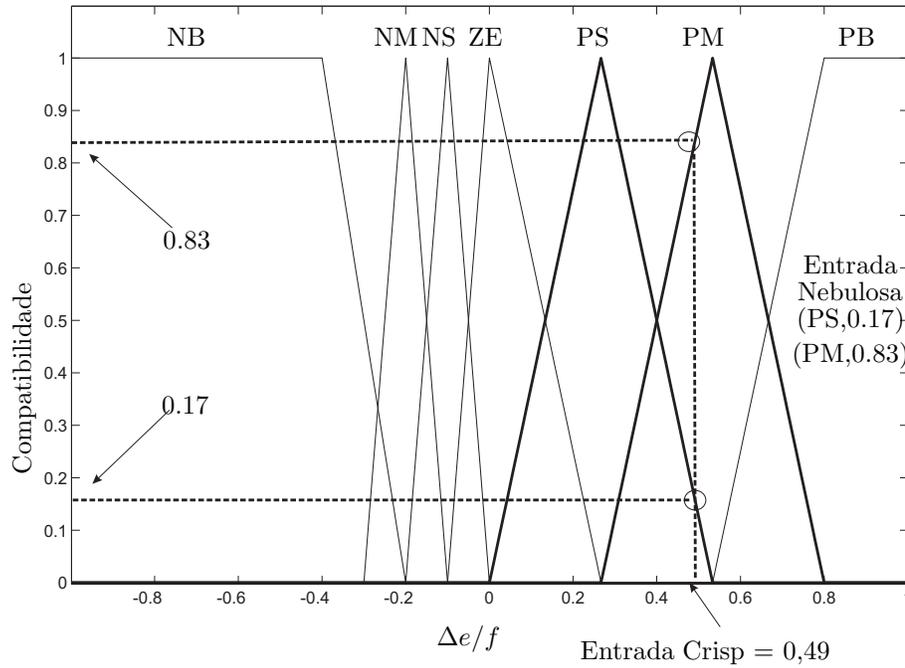


Figura 5.12: Ativação das regras

observar que há uma relação de compromisso entre o número de regras e a necessidade de processamento do controlador.

Ativação das Regras

Quando o controlador recebe sinais de entrada ele precisa interpretar qual o grau de compatibilidade deste valor *crisp* com os conjuntos que representam esta variável. Na Figura 5.12 é mostrado que uma entrada *crisp* de 0.49 para o erro e 0 para variação do erro ativa os conjuntos PS e PM da variável *erro*. Isto faz com que o sistema tenha como uma das entradas nebulosas (PS,0.17) e (PM,0.83) conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Exemplo de fuzzificação

Entrada	Entrada Crisp	Entrada Nebulosa
erro	0.49	(PS,0.17) (PM,0.83)
variação do erro	0.0	(ZE,1)

As entradas acima irão ativar 2 regras que são:

26: If (Erro is PS) and (Mudanca.erro is ZE) then (f is PS) (1)

27: If (Erro is PM) and (Mudanca.erro is ZE) then (f is PM) (1)

Ainda é necessário obter um parâmetro que possa definir o quanto uma regra é verdadeira para uma dada entrada *crisp*. Este parâmetro é conhecido como grau de aplicabilidade da regra. Este processo também é conhecido como implicação. Para se obter o grau de aplicabilidade utiliza-se:

$$\beta = A_1(x_1)^t A_2(x_2)^t \dots A_n(x_n) \quad (5.8)$$

Sendo que, x_i é o valor das entradas *crisp* e $A_i(x_i)$ representa os conjuntos presentes na parte antecedente da variável linguística correspondente. O operador t representa a operação t-norm que pode ser calculada de maneiras diferentes. O operador t-norm representa um conjunto de operadores que satisfazem um conjunto de premissas para realizar uma operação entre conjuntos nebulosos de determinada aplicação. Tem como objetivo generalizar a lógica clássica para valores entre 0 e 1 de maneira a obter um nível de verdade para uma dada proposição. Este trabalho não tem como objetivo entrar em detalhes nas operações com conjuntos nebulosos e a literatura já dispõe de bastante informação a respeito. Portanto, para o controlador utilizado os operadores produto e mínimo satisfazem as premissas. Utilizando o operador produto:

$$\beta = A_1(x_1) * A_2(x_2) * \dots * A_n(x_n) \quad (5.9)$$

Ou pela operação de mínimo:

$$\beta = \min(A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n)) \quad (5.10)$$

Nesta simulação utiliza-se a operação do mínimo para a implicação. Desta forma chega-se um valor que é aplicado à saída da regra 26:

$$\beta_{26} = \min(0.17, 1) = 0.17 \rightarrow \text{Este valor é aplicado na saída da regra 26} \quad (5.11)$$

Para a regra 27:

$$\beta_{27} = \min(0.83, 1) = 0.83 \rightarrow \text{Este valor é aplicado na saída da regra 27} \quad (5.12)$$

A saída terá (PS,0.17) e PM(0.83). Aplicar os β 's na saída significa cortar(ceifar) a referida função de pertinência no valor do β como mostrado na Figura 5.13. Existem

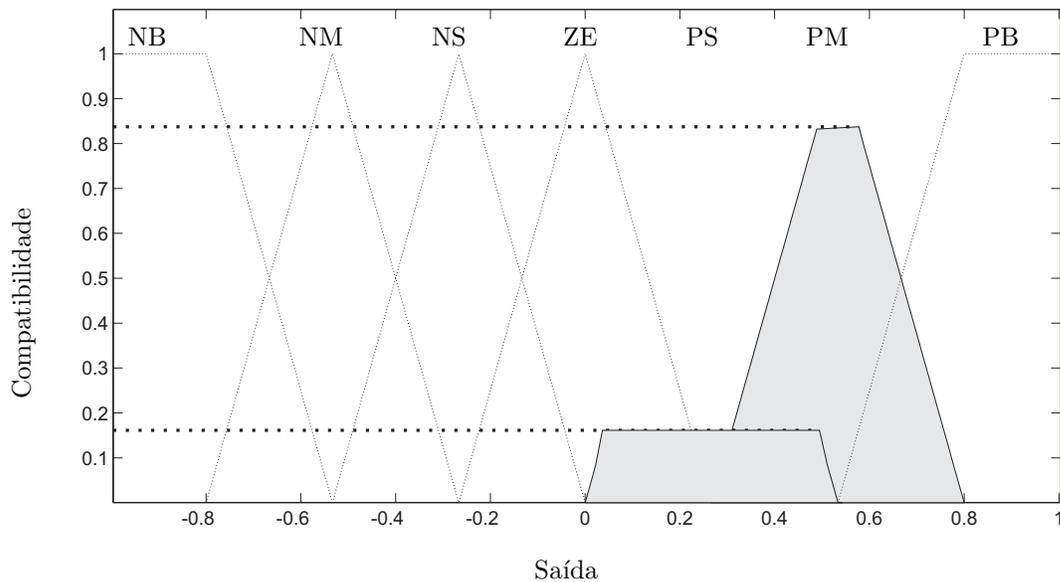


Figura 5.13: União dos resultados das regras ativadas

outras maneiras de se aplicar o β na função, uma delas é escalonar, porém neste trabalho o que se faz é ceifar o conjunto.

A saída é a união dos conjuntos consequentes(ceifados) das regras que foram ativadas, esta etapa é conhecida como agregação.

Isto resultará em um novo conjunto que deverá produzir uma saída numérica através do processo de defuzzificação.

Defuzzificação

A defuzzificação é conhecida como a decodificação da informação baseada em conjuntos nebulosos para um valor numérico. Mais precisamente, na defuzzificação um valor numérico é obtido a partir de uma fórmula que pondera e combina as possíveis saídas de controle (F_n) provenientes da base de regras.

Os métodos de defuzzificação possuem diferentes fórmulas para se obter o valor numérico para a variável de controle. O método mais utilizado é o método do centróide, não quer dizer que seja o melhor. Além deste, existem diversos outros métodos como o da média dos máximos e centro das somas que podem ser mais precisamente descritos em Reznik (1997), Vas (1999), Chen e Pham (2001), Pedricz e Gomide (1998).

A defuzzificação pelo método do centróide utiliza a seguinte fórmula:

$$f^* = \frac{\sum_{i=1}^k u_i * \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^k \mu(u_i)} \quad (5.13)$$

Esta equação obtém o centro de gravidade da área mais escura da Figura 5.13 resultante da agregação. O resultado de f^* é 0,45 e isto representa o incremento de frequência que busca zerar o erro. Como era de se esperar um erro positivo requer um incremento de frequência positivo.

Sintonia do Controlador Nebuloso

A sintonia do controlador nebuloso inicia na escolha da forma dos conjuntos nebulosos que representam a variável linguística em questão. A forma de onda triangular e trapezoidal são as mais comumente utilizadas por facilitarem o processo de defuzzificação e exigirem menos esforço computacional. Os parâmetros K_e , $K_{\Delta e}$ e k_f exibidos na Figura 5.8 representam os fatores de escalonamento das variáveis linguísticas erro, variação do erro e saída (representando o incremento de frequência necessário) respectivamente.

O ajuste do fator de escalonamento da saída afeta o ganho de malha fechada, conseqüentemente afeta a estabilidade do sistema. Este, é geralmente o fator que se procura ajustar primeiro, devido ao seu forte impacto na estabilidade e sua influência no comportamento oscilatório do sistema. Os fatores de escalonamento das entradas influenciam mais na sensibilidade do sistema e na faixa de operação.

Neste trabalho os valores dos fatores de escalonamento que apresentaram resultados mais satisfatórios são $K_e = 0,5$; $K_{\Delta e} = 0,02$ e $K_f = 0,05$.

É importante lembrar que uma das vantagens do controlador nebuloso em relação aos demais controladores é a não necessidade de se dispor de um modelo matemático que represente o processo a ser controlado, não importa se o processo é linear (não importa a ordem da linearidade) ou não-linear (não importa o tipo de não-linearidade). O preço pago por estas grandes vantagens é a complexidade computacional exigida nas seguintes etapas: Fuzzificação \rightarrow Base de regras \rightarrow Defuzzificação. É muito difícil se obter um melhor controlador sem algum esforço mesmo considerando outro tipo de

controlador. No entanto, o desenvolvimento de computadores de alta velocidade tem facilitado a execução destas tarefas.

5.4 Resultados da simulação

Para avaliar o desempenho do sistema descrito acima vários cenários foram simulados, para avaliação do sistema sob variação de radiação solar com o emprego do controlador PI e nebuloso.

5.4.1 Simulações com controlador PI

A seguir são apresentados resultados para a simulação do sistema de bombeamento descrita neste capítulo empregando o controlador PI.

Aumento da radiação solar

A Figura 5.15(a) mostra a radiação solar G_a , a corrente de curto-circuito I_{SC} e a corrente de referência I_{REF} . Vê-se que, conforme esperado, I_{SC} e I_{REF} são proporcionais a radiação, ou seja, são proporcionais à potência solar fornecida às placas solares.

A Figura 5.15(b) apresenta o valor de referência e o valor da corrente nos terminais do painel solar. Nota-se que o controlador faz o sistema seguir a referência mostrando que o controlador atua de maneira adequada. Pode-se observar a ocorrência dos curto-circuitos em mais detalhes na Figura 5.14.

As Figuras 5.15(c) e 5.15(d) mostram, respectivamente, a frequência de acionamento do motor de indução e a velocidade do eixo. Nota-se que ambas aumentam, durante o período de maior radiação, pois há mais potência disponibilizada pelas placas nesta situação. Finalmente são apresentados nas Figuras 5.15(e) e 5.15(f) os gráficos da potência de saída da bomba e a tensão no link CC. A tensão no link CC sofre forte influência durante os transitórios mas consegue se restabelecer adequadamente.

Diminuição da radiação solar

A Figura 5.16(a) mostra a radiação solar G_a , a corrente de curto-circuito I_{SC} e a corrente de referência I_{REF} .

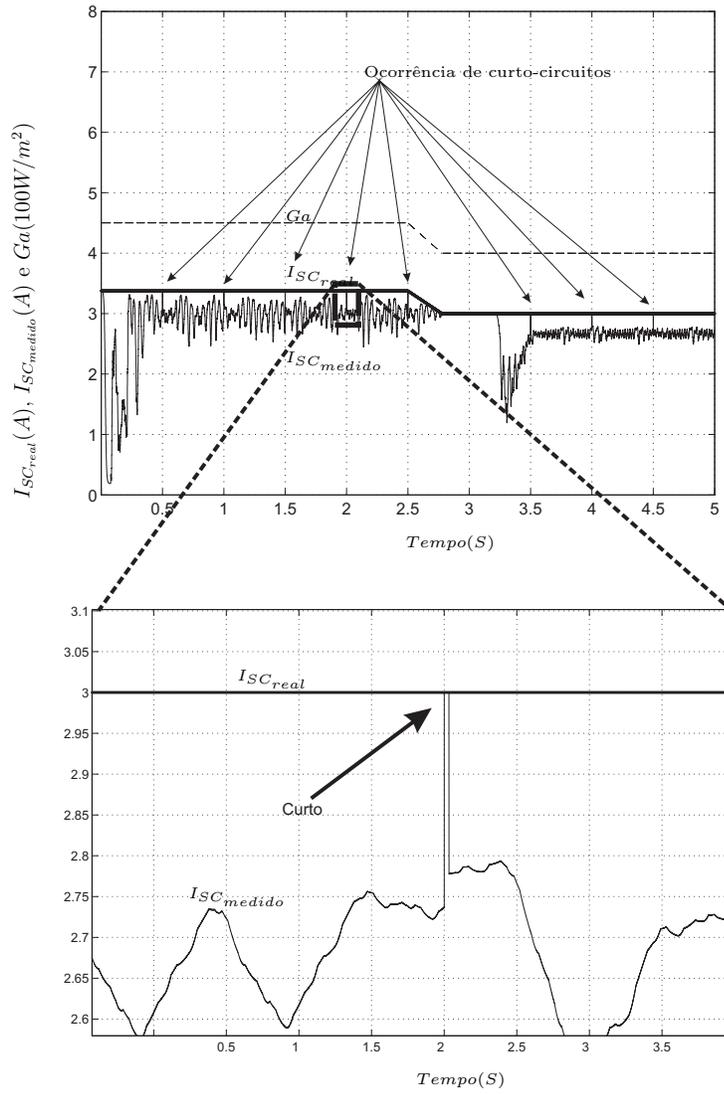


Figura 5.14: Ocorrência dos curto-circuitos

A Figura 5.16(b) apresenta o valor de referência e o valor da corrente nos terminais do painel solar. Nota-se também que neste teste de diminuição o controlador faz o sistema seguir a referência mostrando que o controlador atua de maneira adequada.

As Figuras 5.16(c) e 5.16(d) mostram, respectivamente, a frequência de acionamento do motor de indução e a velocidade do eixo. Nota-se que ambas diminuem, durante o período de menor radiação, pois há menos potência disponibilizada pelas placas nesta situação.

Finalmente são apresentados nas Figuras 5.16(e) e 5.16(f) os gráficos da potência de saída da bomba e a tensão no link CC. Para o teste de diminuição percebeu-se uma maior perturbação do link CC.

5.4.2 Simulações com controlador nebuloso

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações para o mesmo sistema de bombeamento, só que empregando o controlador nebuloso. Os resultados mostrados serão comparados com os apresentados na seção anterior, que exibiu os resultados empregando-se o controlador PI.

Aumento da radiação solar

A Figura 5.17(a) mostra a radiação solar G_a , a corrente de curto-circuito I_{SC} e a corrente de referência I_{REF} .

A Figura 5.17(b) apresenta o valor de referência e o valor da corrente nos terminais do painel solar. Nota-se que o controlador nebuloso faz o sistema seguir a referência apresentando um melhor tempo de resposta em relação ao controlador PI, que pode ser mais bem percebido na Figura 5.19. Pode-se observar a ocorrência dos curto-circuitos em mais detalhes na Figura 5.14.

As Figuras 5.17(c) e 5.17(d) mostram, respectivamente, a frequência de acionamento do motor de indução e a velocidade do eixo. Nota-se que ambas aumentam, durante o período de maior radiação, pois há mais potência disponibilizada pelas placas nesta situação.

Finalmente são apresentados nas Figuras 5.17(e) e 5.17(f) os gráficos da potência de saída da bomba e a tensão no link CC.

Diminuição da radiação solar

A Figura 5.18(a) mostra a radiação solar G_a , a corrente de curto-circuito I_{SC} e a corrente de referência I_{REF} .

A Figura 5.18(b) apresenta o valor de referência e o valor da corrente nos terminais do painel solar. Nota-se que o controlador nebuloso faz o sistema seguir a referência apresentando um melhor tempo de resposta em relação ao controlador PI, a comparação pode ser vista na Figura 5.19.

As Figuras 5.18(c) e 5.18(d) mostram, respectivamente, a frequência de acionamento do motor de indução e a velocidade do eixo. Nota-se que ambas diminuem, durante o período de menor radiação, pois há menos potência disponibilizada pelas placas nesta situação.

Finalmente são apresentados nas Figuras 5.18(e) e 5.18(f) os gráficos da potência de saída da bomba e a tensão no link CC. Para o teste de diminuição percebeu-se uma maior perturbação do link CC.

Comparação dos Controladores Obtidos

Analisando os diferentes resultados nota-se que o tempo de resposta do controlador PI é maior do que o controlador nebuloso conforme observa-se na Figura 5.19.

Observa-se também que o *link* CC sofre uma queda durante a diminuição da radiação. Isto decorre do fato de que na diminuição da potência disponível o sistema leva tempo para interpretar que o motor necessita diminuir a potência consumida (reduzir a velocidade) fazendo com que o ponto de operação fique durante algum tempo na região conhecida como fonte de corrente já descrita na Seção 2.2.3. Nesta situação o controlador precisa atuar rapidamente pois o sistema pode parar se a tensão do *link* CC cair muito. A Figura 5.20 compara a queda no *link* CC para os dois controladores e demonstra que o nebuloso consegue recuperar o nível de tensão do *link* CC mais rapidamente.

Na Figura 5.21 é exibido o diagrama de blocos do sistema em simulink, onde é possível notar os blocos que representam os painéis solares e as condições ambiente. Observa-se um filtro contendo um capacitor e um diodo para evitar retorno da corrente, nota-se também os blocos de controle contendo o controlador e bloco que implementa

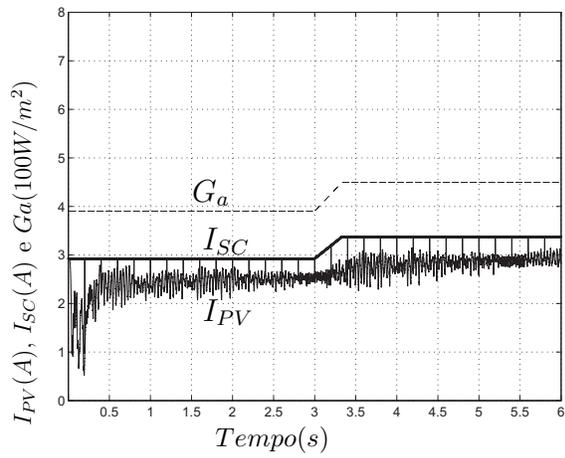
o chaveamento utilizando vetores espaciais. Ainda na Figura 5.21 é possível observar a representação do inversor trifásico, do MIT e da bomba centrífuga.

Na Figura 5.22 observa-se a parte interna do bloco que representa os painéis solares, onde é possível notar a representação das equações das características elétricas de uma célula solar já mostradas na Seção 2.2.3.

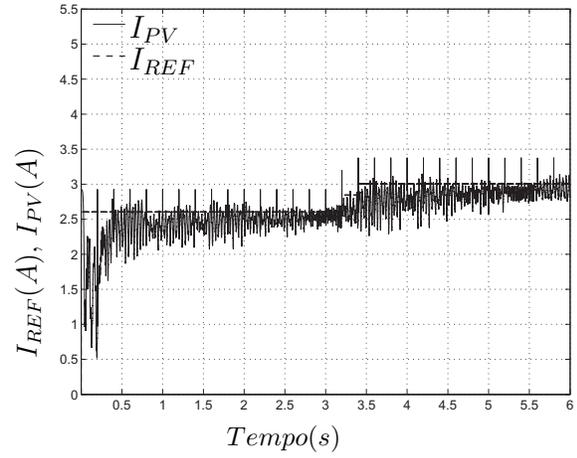
A Figura 5.23 mostra o detalhamento do bloco da bomba e suas curvas características. Internamente há os parâmetros da bomba e as equações que a modelam.

E na Figura 5.24 é exibido o diagrama de blocos dos controladores PI e nebuloso.

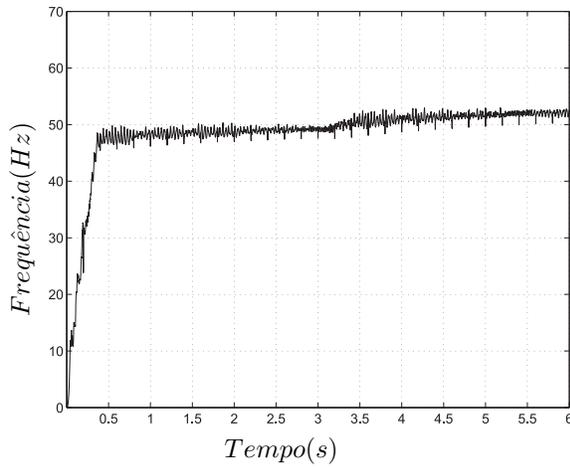
Os resultados das simulações demonstraram a potencialidade das técnicas apresentadas para bombeamento d'água. Os gráficos evidenciaram que o controlador nebuloso tem melhor desempenho que o controlador PI; isto já era esperado, pois a literatura sobre o tópico de controladores já destacou que o PI tem o seu desempenho deteriorado quando o sistema é não linear e quando a referência varia acentuadamente. Para estas situações um controlador como o nebuloso torna-se uma boa alternativa.



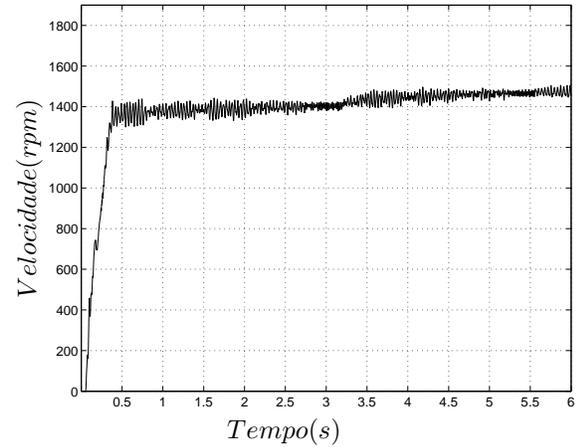
(a)



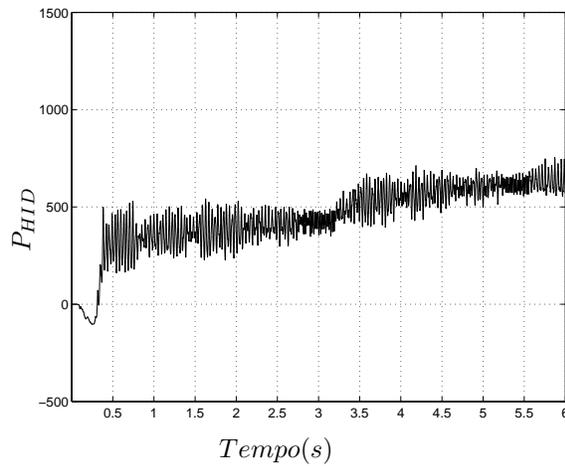
(b)



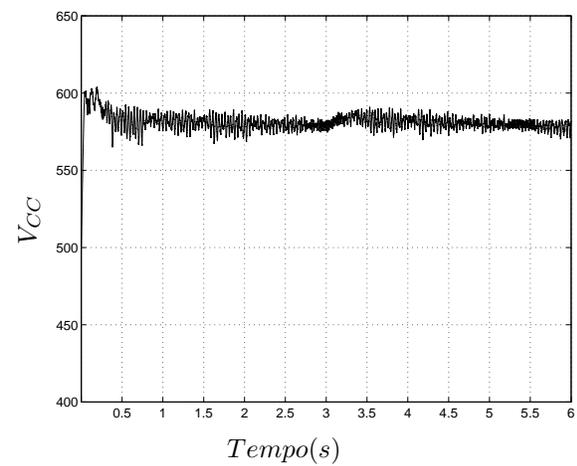
(c)



(d)

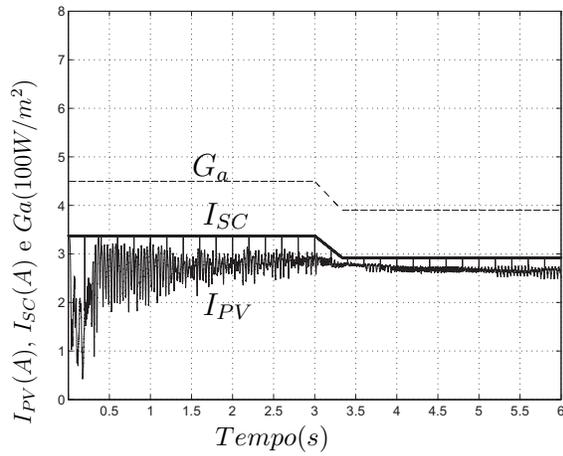


(e)

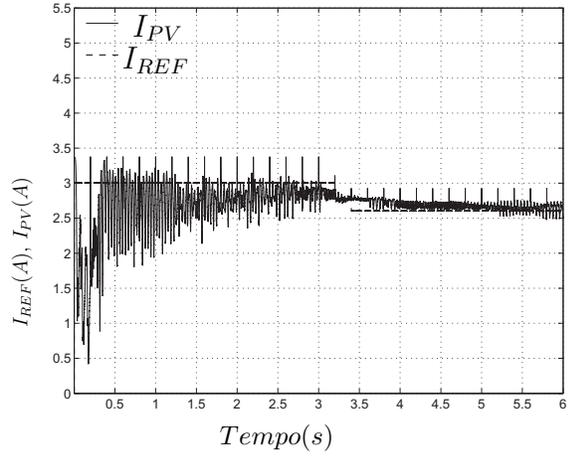


(f)

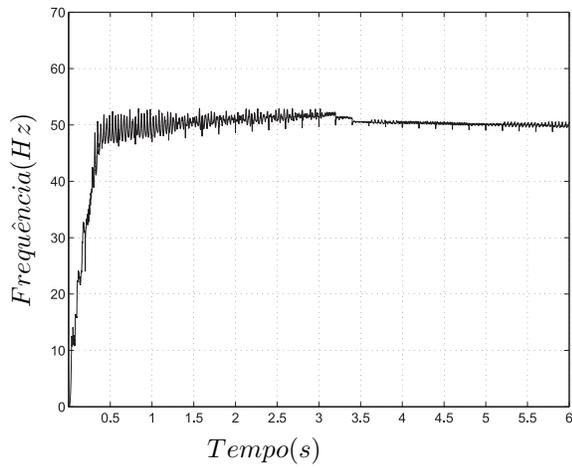
Figura 5.15: Teste de aumento da radiação solar de 400 W/m^2 para 450 W/m^2 empregando o controlador PI.



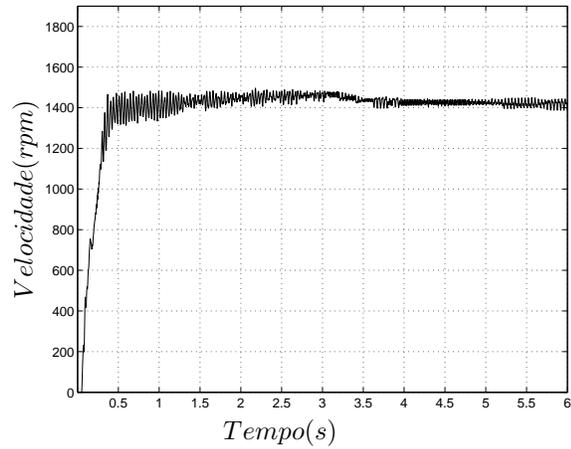
(a)



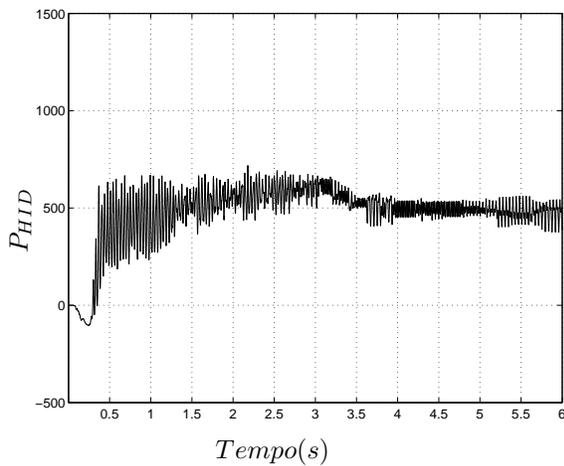
(b)



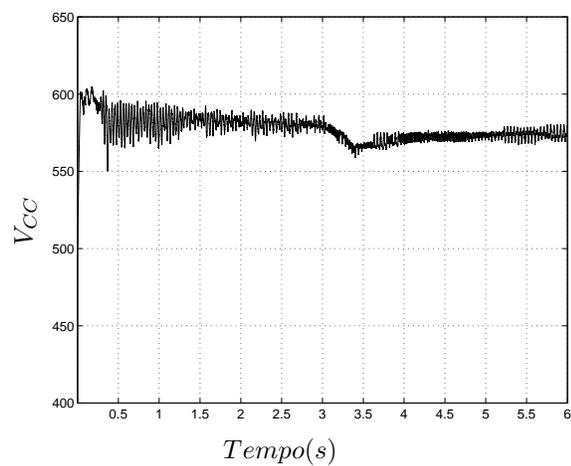
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.16: Teste de diminuição da radiação solar de $450 W/m^2$ para $400 W/m^2$ empregando o controlador PI.

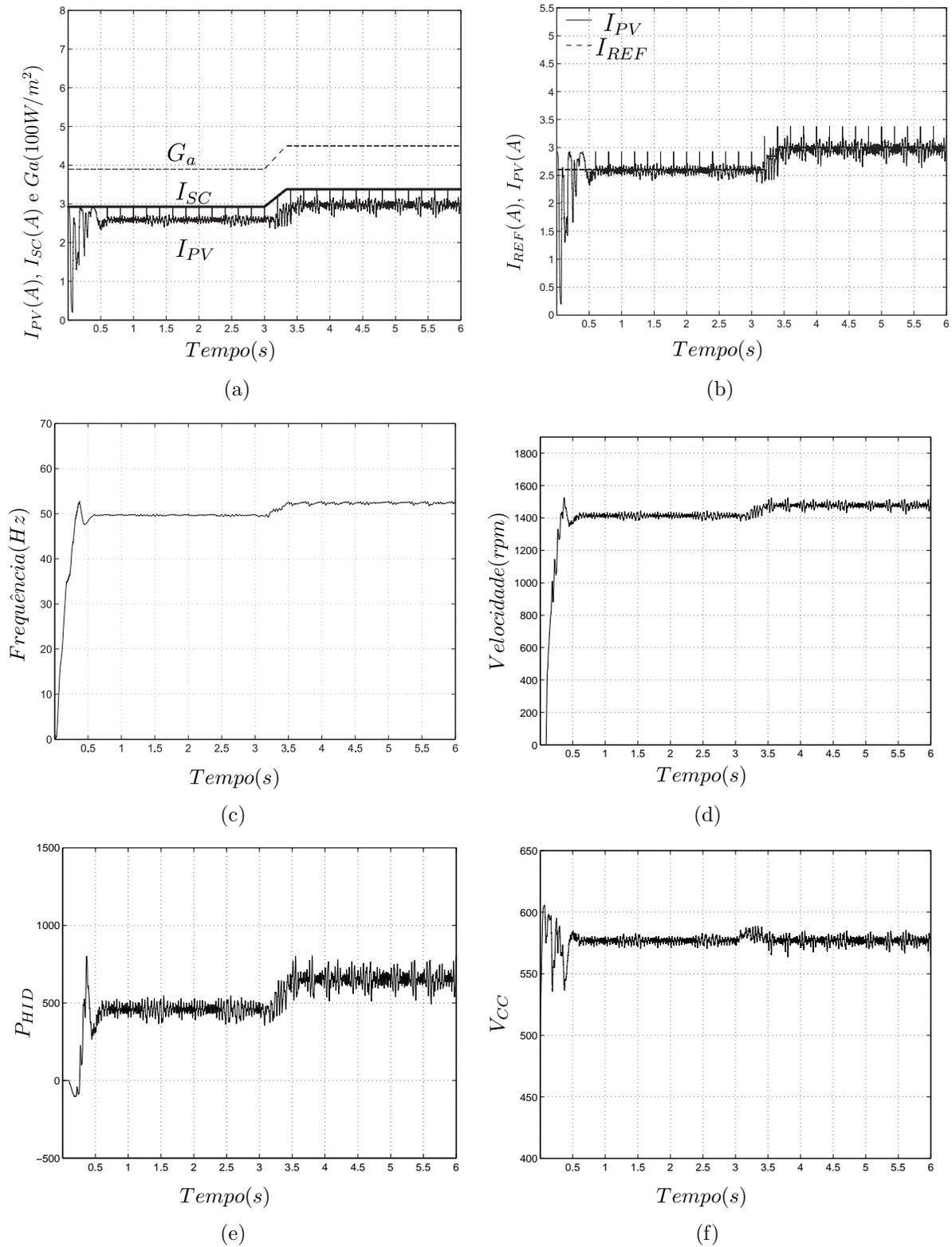
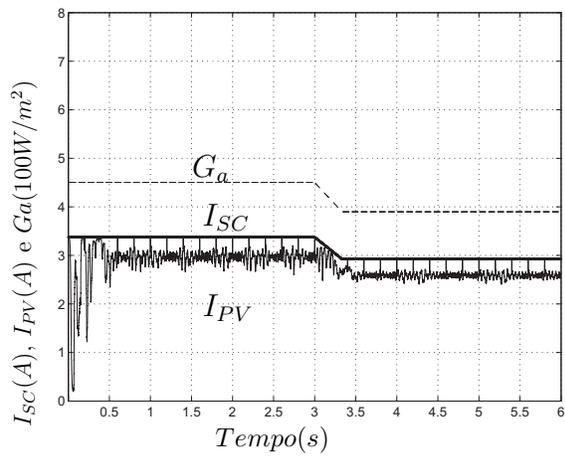
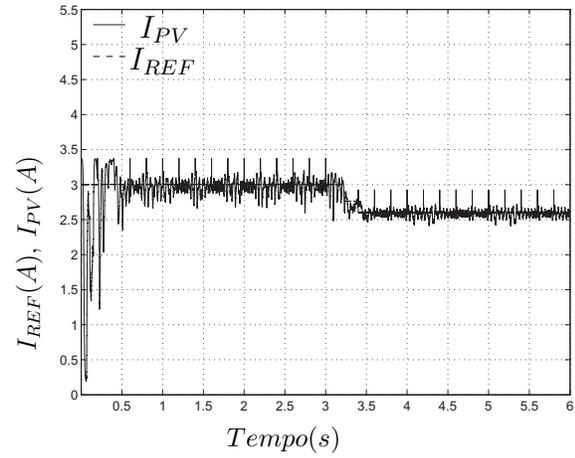


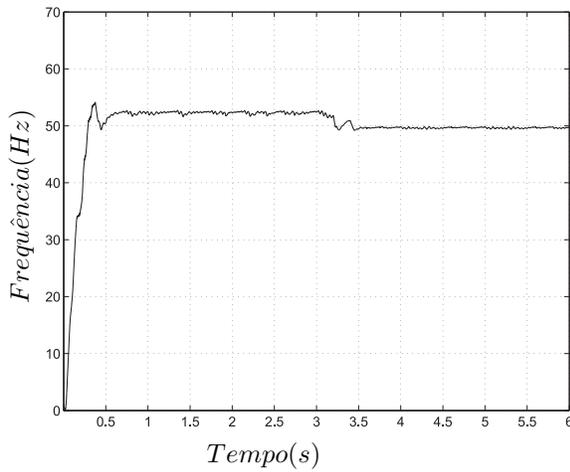
Figura 5.17: Teste de aumento da radiação solar de 400 W/m^2 para 450 W/m^2 empregando o controlador nebuloso.



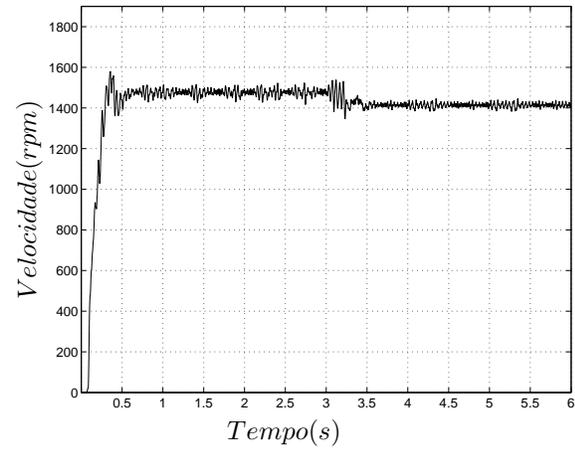
(a)



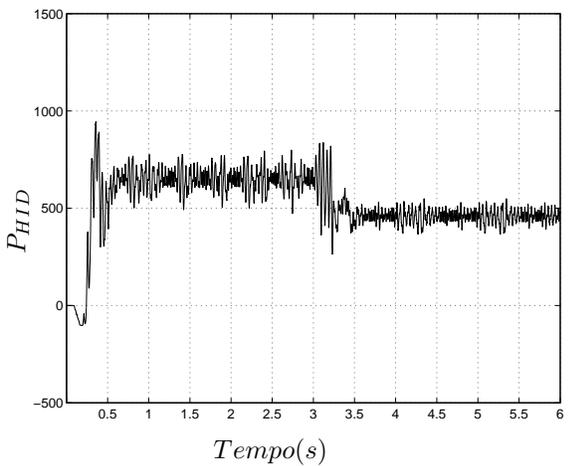
(b)



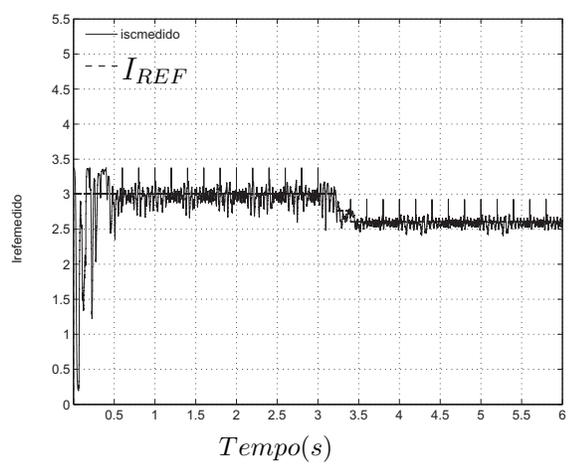
(c)



(d)

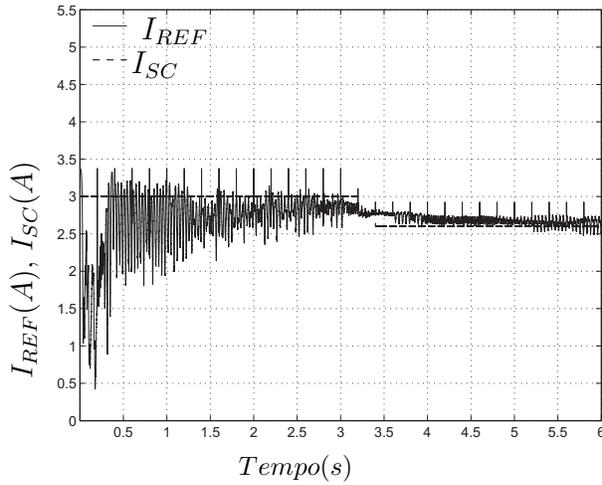


(e)

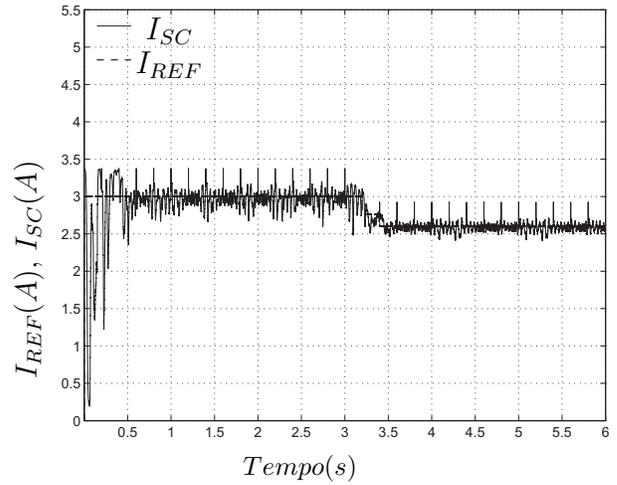


(f)

Figura 5.18: Teste de diminuição da radiação solar de 450 W/m^2 para 400 W/m^2 empregando o controlador nebuloso.

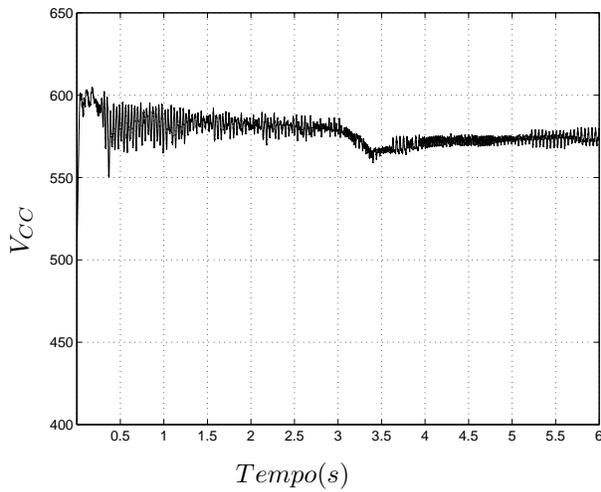


(a)

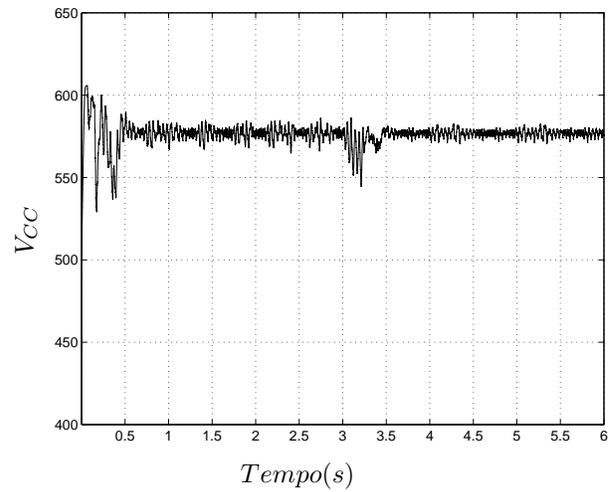


(b)

Figura 5.19: Comparação entre controlador PI e nebuloso



(a) Controlador PI



(b) Controlador nebuloso

Figura 5.20: Comparação da perturbação no link CC entre o controlador PI e nebuloso

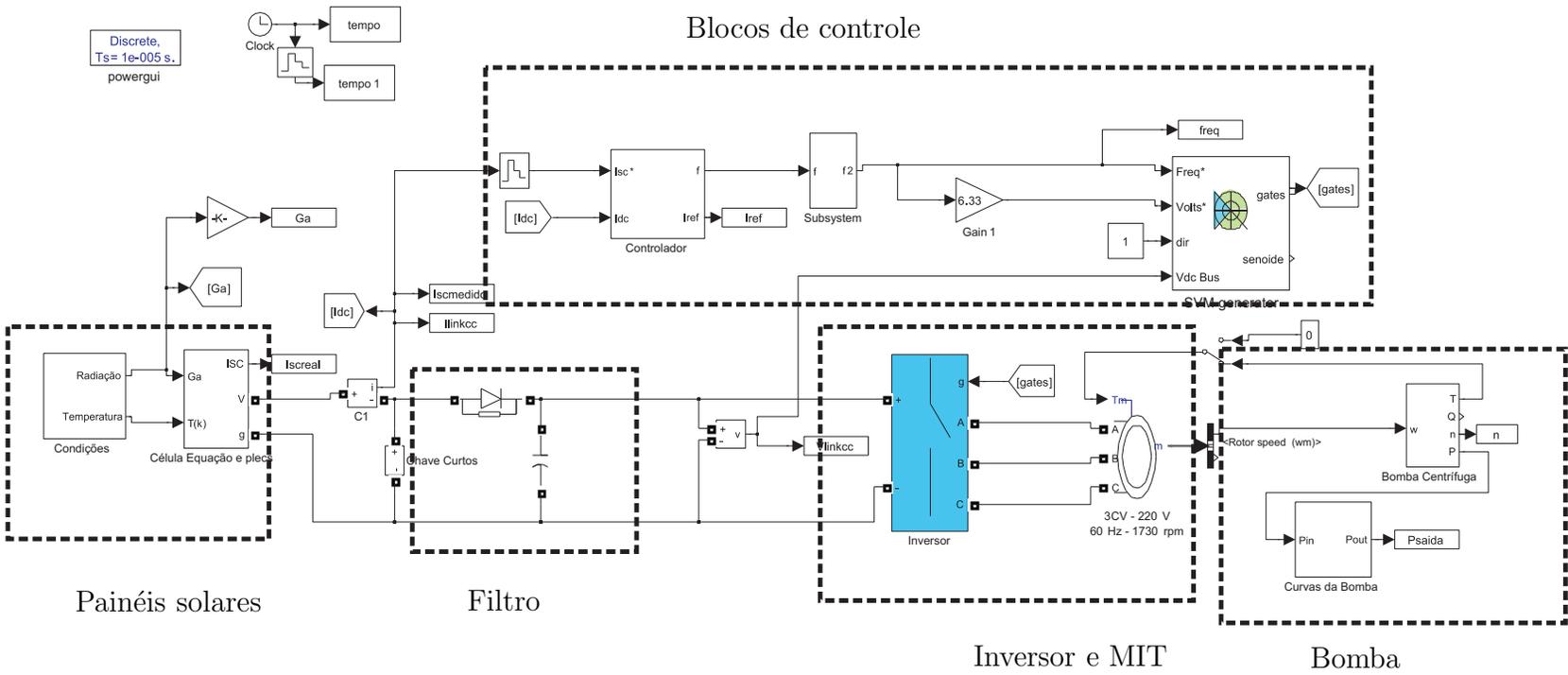


Figura 5.21: Diagrama de blocos do sistema em simulink

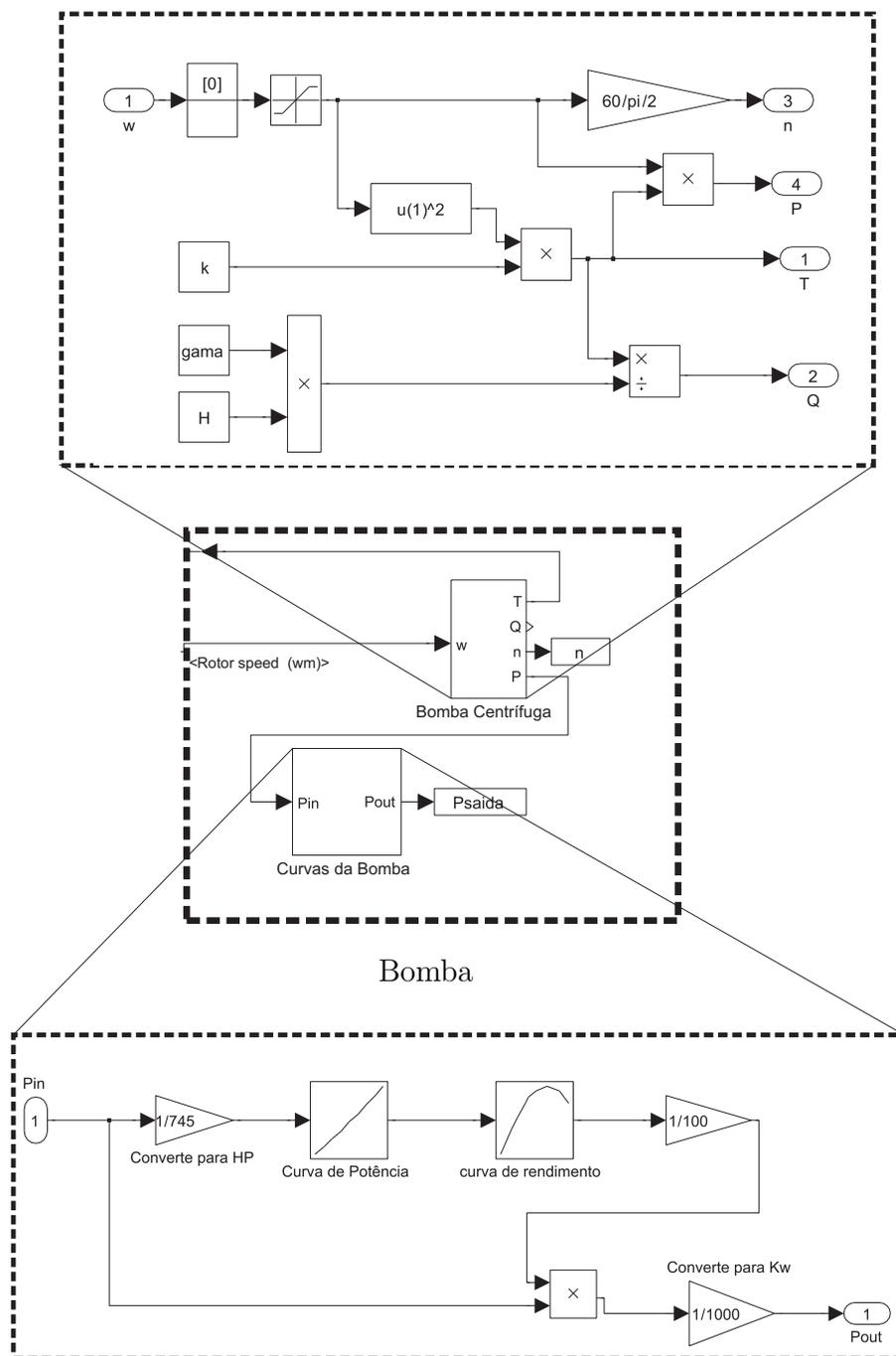


Figura 5.23: Detalhamento da Bomba

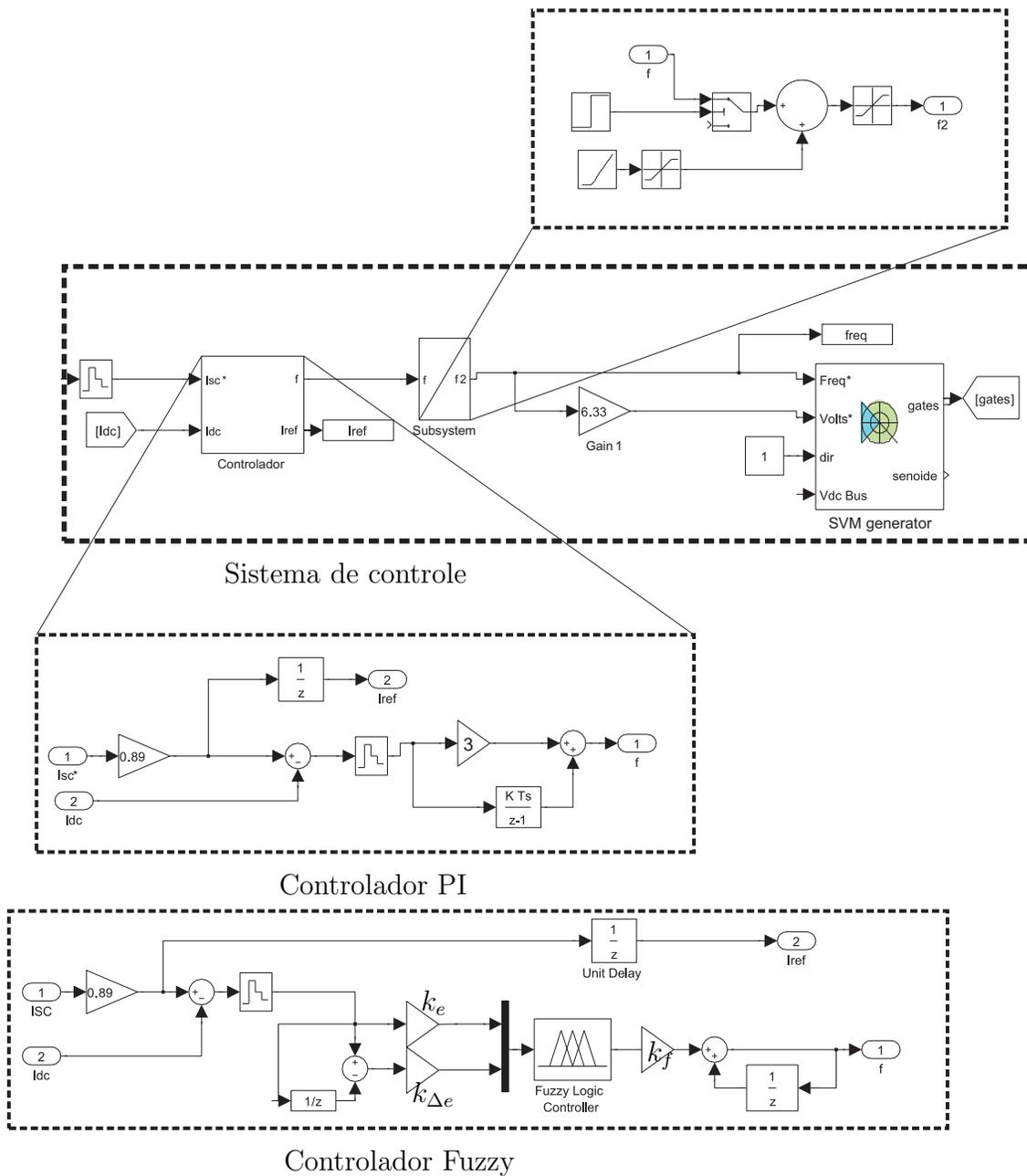


Figura 5.24: Detalhamento do sistema de controle

Capítulo 6

Considerações finais

A seguir são apresentadas as conclusões e as sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Esta dissertação avalia em simulações um sistema de bombeamento d'água empregando energia solar. O sistema estudado foi desenvolvido no *software* Simulink/Matlab, de maneira que, o sistema de placas solares mantinha-se aproximadamente no valor de máxima eficiência a partir da obtenção da corrente de curto-circuito dos painéis solares. Com intuito avaliar alternativas para melhorar o desempenho deste sistema, foram realizadas simulações com os controladores proporcional-integral e nebuloso.

As simulações apresentadas no Capítulo 5 mostraram a eficiência da técnica de obtenção da corrente para o ponto de máxima potência através da corrente de curto-circuito. Isto garante que as placas operem na condição de máxima eficiência, pois como o período no qual ocorre o curto-circuito é muito pequeno, não há perdas significativas de desempenho.

As comparações entre as simulações do sistema com controladores PI e nebuloso evidenciam o melhor desempenho, deste último. Vê-se que quando a mudança de referência da corrente, o controlador nebuloso trabalha de forma a obter valores de frequência de alimentação do motor de indução que propiciem rápida alteração da potência, garantido máxima eficiência.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

1. Implementação experimental do sistema estudado;
2. Avaliação do uso de um conversor CC-CC controlado posto nos terminais das placas solares. Este tem como função garantir um valor constante para o link CC que alimenta o inversor de frequência;
3. Utilizar um método de busca do MPP mais apurado.

Referências Bibliográficas

- Bekker, B. e Beukes, H. J. (2004). Finding an optimal pv panel maximum power point tracking method, *7th AFRICON Conference in Africa* **2**(15-17): 1125 – 1129.
- Blaabjerg, F., Chen, Z. e Kjaer, S. B. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems, *IEEE Transaction on Power Electronics* **19**(5): 1184–1194.
- Bull, S. R. (2001). Renewable energy today and tomorrow, *Proceedings of the IEEE* **89**(8): 1216–1226.
- CEBDS (2007). Pacto de ação em defesa do clima. O WWF-Brasil, o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), a Petrobrás, a Votorantim e o Greenpeace assinam o pacto.
- Chen, G. e Pham, T. T. (2001). *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems*, CRC Press LLC.
- Chen, Y., Smedley, K., Vacher, F. e Brouwer, J. (2003). A new maximum power point tracking controller for photovoltaic power generation, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC apos;03. Eighteenth Annual IEEE* **1**: 58–62.
- Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T. e Bouzid, A. (2007). A detailed modeling method for photovoltaic cells, *Energy* **32**(9): 1724–1730.
- Câmara Municipal de São Paulo (2007). Lei nº 14.459, de 3 de julho de 2007, Diário Oficial da Cidade de São Paulo. Lei criada pela Câmara Municipal de São Paulo - Acrescenta o item 9.3.5 à Seção 9.3 - Instalações Prediais do Anexo I da Lei nº

- 11.228, de 25 de junho de 1992 (Código de Obras e Edificações), dispõe sobre a instalação de sistema de aquecimento de água por energia solar nas novas edificações do Município de São Paulo.
- Esrarn, T. e Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **22**(2): 439 – 449.
- Fedrizzi, M. C. (2003). *Sistemas Fotovoltáicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições Apreendidas e Procedimentos para Potencializar sua Difusão*, PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Gow, J. A. e Manning, C. D. (1999). Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies, *IEE proceedings. Electric power applications* **146**(2): 193–200.
- Goyal, H. B., Seal, D. e Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**: 504–517.
- Hassmann, K. (1993). Electric power generation, *Proceedings of the IEEE* **81**(3): 346–354.
- Hua, C. e Shen, C. (1998). Study of maximum power tracking techniques and control of dc/dc converters for photovoltaic power system, *Power Electronics Specialists Conference, 1998* **1**(17-22): 86 – 93.
- John, V. e Kolwalkar, Z. Y. A. (2004). Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis, *IEEE Transaction on Power Electronics* **19**(5): 1177–1183.
- Jung, Y., So, J., Y., G. e Choi, J. (2005). Improved perturbation and observation method (ip&o) of mppt control for photovoltaic power systems, *Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE* .
- Kaya, D., Yagmur, E. A., Yigit, K. S., Kilic, F. C., Eren, A. S. e Celik, C. (2008). Energy efficiency in pumps, *Energy Conversion & Management* **49**(6): 1662–1673.

- Kobayashi, K., Matsuo, H. e Sekine, Y. (2006a). An excellent operating point tracker of the solar-cell power supply system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **53**(2): 495–499.
- Kobayashi, K., Matsuo, H. e Sekine, Y. (2006b). Novel solar-cell power supply system using a multiple-input dc-dc converter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **53**(1): 281–286.
- Mahmoud, M. (1990). Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan, *IEE PROCEEDINGS C* **137**(6): 391–394.
- Markvart, T. (ed.) (2000). *Solar Electricity*, John Wiley & Sons, LTD.
- Marwali, M. N., Jung, J.-W. e Keyhani, A. (2004). Control of distributed generation systems - part ii: Load sharing control, *IEEE Transactions on Power Electronics* **19**(6): 1551–1561.
- Meah, K., Fletcher, S. e Ula, S. (2006). Solar photovoltaic water pumping for remote locations, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **12**(2): 472–487.
- Messenger, R. A. e Ventre, J. (2004). *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press.
- Muljadi, E. (1997). Pv water pumping with a peak-power tracker using a simple six-step square-wave inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications* **33**(3): 714–721.
- Oliveira, J. A. P. (2002). The policymaking process for creating competitive assets for the use of biomass energy: the Brazilian alcohol programme, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **6**: 129–140.
- Pan, C.-T., Chen, J. Y., Chu, C.-P. e Huang, Y.-S. (1999). A fast maximum power point tracker for photovoltaic power systems, *The 25th Annual Conference of the IEEE* **1**: 390 – 393.
- Pedricz e Gomide (1998). *An introduction to fuzzy sets, analysis and design.*, The MIT Press.
- Reznik, L. (ed.) (1997). *Fuzzy Controllers*, BH Newnes.

- Salles, A. C. N., Melo, A. C. G. e Legey, L. F. L. (2004). Risk analysis methodologies for financial evaluation of wind energy power generation projects in the brazilian system, *8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* pp. 457–462.
- Schwartz, R. J. (1993). Photovoltaic power generation, *Proceedings of the IEEE* **81**(3): 355–364.
- Senado Federal (2003). Lei nº 10.762, Diário Oficial da União. Lei criada pelo Senado Federal - Dispõe sobre a criação do Programa Emergencial e Excepcional de Apoio às Concessionárias de Serviços Públicos de Distribuição de Energia Elétrica, altera as Leis nºs 8.631, de 4 de março de 1993, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=237736>.
- Senado Federal (2005). Lei nº 11.097, Diário Oficial da União. Lei criada pelo Senado Federal - Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=240392>.
- Shimizu, T., Hashimoto, O. e Kimura, G. (2003). A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system, *IEEE Transactions on Power Electronics* **18**(2): 704–711.
- Short, T. D. e Mueller, M. A. (2002). Solar water pumps: Problems, pitfalls and potential, *Power Electronics, Machines and Drives, 2002. International Conference on* pp. 280– 285.
- Solodovnik, E. V., Liu, S. e Dougal, R. A. (2004). Power controller design for maximum power tracking in solar installations, *IEEE Transactions on Power Electronics* **19**(5): 1295–1304.
- Szlufcik, J., Sivothythaman, S., Nijs, J. F., Mertens, R. P. e Overstraeten, R. V. (1997). Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells, *Proceedings of the IEEE* **85**(5): 711–730.

- Tan, C. W., Green, T. e Hernandez-Aramburo, C. A. (2005). An improved maximum power point tracking algorithm with current-mode control for photovoltaic applications, *International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005*. **1**: 489–494.
- Vas, P. (1999). *Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives: Application of Fuzzy, Neural, Fuzzy-neural, and Genetic-Algorithm-based Techniques*, Oxford University Press.
- Xiao, W., Dunford, W. G. e Capel, A. (2004). A novel modeling method for photovoltaic cells, *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* **3**(20-25): 1950–1956.
- Yu, M. P. I. (2004). A study on the optimal voltage for mppt obtained by surface temperature of solar cell, *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE* **3**: 2040– 2045.
- Yuvarajan, S. e Xu, S. (2003). Photo-voltaic power converter with a simple maximum-power-point-tracker, *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems 2003 (ISCAS '03)*, Vol. 3, pp. 399–402.
- Zeineldin, H. H., El-Saadany, E. F. e Salama, M. M. A. (2006). Impact of dg interface control on islanding detection and nondetection zones, *IEEE Transactions on Power Delivery* **21**(3): 1515–1523.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)