

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLE MODULAR HCC PARA
INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

José Paulo de Barros Neto

Santa Maria, RS, Brasil

2006

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLE MODULAR HCC PARA INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Por

José Paulo de Barros Neto

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Felix Alberto Farret, PhD

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLE MODULAR HCC PARA
INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA**

Elaborada por

José Paulo de Barros Neto

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Processamento de Energia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Felix Alberto Farret, Ph.D.
(Presidente/Orientador)

Jonas Rodrigues Gomes, Dr. (CGTEE/ELETROBRÁS)

Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)

Alzenira R. Abaide, Dra. (UFSM)

Santa Maria, 16 de Fevereiro de 2006

AGRADECIMENTOS

Ao professor Felix Alberto Farret, por sua experiência, conhecimento, profissionalismo, incentivo e amizade demonstrados durante a orientação deste trabalho.

À todos os colegas do NUDEMI-CEEMA, que foram imprescindíveis na condução do desenvolvimento dos experimentos.

Aos funcionários Fernando, Jumar, Carmen e Anacleto do NUPEDEE, que sempre se mostraram dispostos a ajudar em todos os momentos.

Aos professores, que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento da parte teórica dos estudos.

À funcionária administrativa do PPGEE Cleonice Sanger, por sua eficiência, amizade e simpatia.

Em especial ao mestrando Andrei Franco, por sua dedicação e por seu apoio total no momento de finalização deste trabalho.

A todas as pessoas que não foram citadas, mas que de algum modo contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLE MODULAR HCC PARA INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

AUTOR: JOSÉ PAULO DE BARROS NETO
ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de Fevereiro de 2006

A experiência do racionamento de energia elétrica no ano de 2001 no Brasil demonstrou que nossa dependência quase que exclusivamente da hidroeletricidade pode nos trazer grandes problemas. Assim sendo, a existência de alternativas de energia confiáveis deve existir, no mínimo, como reserva. Por esse motivo, a perspectiva da descentralização da produção de energia como forma de promoção do desenvolvimento sócio-econômico de comunidades não atendidas pelas formas convencionais de energia bem como para produção em massa de energias alternativas para grandes sistemas de potência, foram as motivações deste trabalho. A necessidade de um conhecimento melhor da integração entre as fontes de energia. Tais temas justificaram a realização da análise do desempenho e o desenvolvimento de tecnologia para a integração de diversos tipos de fontes alternativas transformadas em fontes de corrente como forma de se evitar a circulação de correntes entre as fontes por diferenças individuais de tensão. O controle da tensão de carga usa a modulação de uma carga secundária em paralelo com outra primária tal que os excessos de corrente das fontes sejam drenados apenas para a carga

secundária mantendo-se inalteradas as condições da carga primária. Para gerenciar a distribuição das correntes e a tensão na carga principal, utilizou-se um controlador modular, dedicado e expansível para sistemas híbridos de geração de energia elétrica tais como o eólico-solar-armazenamento para geração de energia elétrica de forma confiável, desassistida e autônoma. O sistema de energia desenvolvido permite o controle e o acionamento integrados das formas mais conhecidas de geração de energia envolvendo fontes como a hidráulica, a eólica, armazenadores de energia, em especial, as baterias. O programa de controle é adequado para integrar outras formas de geração, independente de sua origem. O controle como um todo, baseia-se no algoritmo "Hill Climbing Control" (HCC) para maximização individual da potência gerada em cada fonte e para o contingenciamento da rotação pela carga, de modo a se obter o melhor proveito das instalações. Por outro lado, a tensão de saída é modulada através da carga secundária de tal forma a compor uma impedância a ser vista pela fonte de corrente resultante das fontes primárias que estabilize em torno da tensão nominal. Esta dissertação mostra os resultados práticos relativos a um protótipo de controle baseado no PIC18F452 para distribuição de energia a partir de uma central de geração de energia elétrica instalado e funcionando no campus da UFSM. O módulo controlador de potência como se apresenta, presta-se para a utilização dos recursos da eletrônica híbrida e da microeletrônica que podem concentrar num único "chip" diversos circuitos, incluindo conversores de potência, conversores A/D, memória de programa, memória de dados, módulos de captura e comparação, temporizadores e módulos PWM, entre outros.

Palavras-chave: *Controle eletrônico pela carga, energias alternativas, integração de energia, sistemas híbridos de geração, geração distribuída.*

ABSTRACT

MSc Dissertation
Post-Graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MODULAR HCC CONTROLLER TO INTEGRATE ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY

AUTHOR: JOSÉ PAULO DE BARROS NETO
SUPERVISOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Date and Place: February, 24th 2005, Santa Maria, RS, Brazil

The experience of electric energy shortage in 2001 demonstrated that our dependence almost exclusively on hydroelectricity could fetch great problems to Brazil. Thus being, the existence of trustworthy alternatives of energy must exist, at the very least, as a reserve. For this reason, the perspective of decentralizing the energy production as a form of promoting the socio-economic development of remote communities not connected to the public distribution system as well for mass production of electricity, are the motivations of this work. Such situation justified the analysis of performance and development of the integration of diverse types of alternative primary sources by transforming them into current sources as a means of preventing the circulation of current due to voltage differences across the sources. Control of the load voltage uses the modulation of a secondary load in parallel with a primary load in such a way that current excesses from the current sources are drained only through the secondary load, remaining unchanged the conditions for the primary load. To manage the voltage and current distribution in

the main load, a module, dedicated and expandable controller is proposed for hybrid systems of electric energy generation such as those using wind-solar-storage for generation of electric energy in a trustworthy form, unassisted and independent. The proposed integrated system of energy does allow the control and integration of the most usual forms of energy generation such as hydraulic, wind, storage of energy, specially, in batteries. The control program is also adjusted to integrate other forms of generation, independent of its origin. The control as a whole is based on the algorithm "Hill Climbing Control" (HCC) for individual maximization of the generated power and rotation in each source and regulating the voltage across the load, in order to get the best advantage from the installations. In this dissertation is also shown some practical results about the proposed theory on a prototype of control based on the micro controller PIC18F452 for distribution of energy from a power plant of electric energy generation installed and operating in the CEEMA-UFSM campus. Furthermore, the controller module of power as presented in this work is more useful among others because it allows the use of hybrid electronics and microelectronics that are able of concentrating several circuits in a only "chip", including control functions for power conversion, A/D devices, program memory, data memory, modules for capture and comparison, timers and PWM modules.

Key words: *Electronic control by the load, alternative sources of energy, energy integration, hybrid generating systems, distributed generation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Características de magnetização do gerador de indução.....	14
Figura 3.2 – Distribuição da radiação ao longo do dia.....	16
Figura 3.3 – Efeitos da intensidade luminosa.....	16
Figura 3.4 – Efeitos da variação da temperatura.....	17
Figura 3.5 – Característica elétrica dos módulos.....	17
Figura 3.6 – Circuito equivalente da célula fotovoltaica.....	18
Figura 3.7 – Estabilidade operacional e adaptação à carga com potência constante..	21
Figura 3.8 – Ciclo de Carga e descarga de uma bateria.....	24
Figura 4.1 – Modelo do Gerador Eólico.....	27
Figura 4.2 – Modelo do Controle do Gerador Eólico.....	27
Figura 4.3 – Simulação do controle de corrente do Gerador Eólico.....	28
Figura 4.4 – Sensor de Tensão.....	28
Figura 4.5 – Sensor de Corrente.....	29
Figura 4.6 – Filtro passa-baixas.....	29
Figura 4.7 – Representação dos módulos fotovoltaicos.....	30
Figura 4.8 – Circuitos de controle dos módulos fotovoltaicos.....	31
Figura 4.9 – Curvas de descarga de baterias.....	32
Figura 4.10 – Representação do banco de baterias.....	32
Figura 4.11 – Modelo de controle da carga e descarga das baterias.....	33
Figura 4.12 – Circuito de controle da tensão da carga principal.....	34
Figura 4.13 – Simulação de ajuste da tensão da carga.....	34

Figura 4.14 – Representação do algoritmo Hill Climbing control.....	35
Figura 4.15 – Fluxograma de controle do módulo gerador 1.....	37
Figura 4.16 – Fluxograma de controle do módulo gerador 2.....	38
Figura 4.17 – Circuito do conversor buck.. ..	39
Figura 4.18 – Formas de onda de corrente no indutor e tensão de entrada do filtro LC.. ..	40
Figura 4.19 – Corrente no capacitor C.....	41
Figura 4.20 – Conversor buck implementado.....	42
Figura 4.21 – Placa principal do módulo controlador.....	43
Figura 4.22 – Área de operação segura do Mosfet IRFZ46.....	44
Figura 4.23 – Placa de potência do módulo controlador.....	44
Figura 4.24 – Mostradores do módulo de controle.....	46
Figura 4.25 – Cargas utilizadas nos testes.....	46
Figura 4.26 – Módulo controlador já montado em gabinete.....	47
Figura 5.1 – Representação do sistema híbrido.....	49
Figura 5.2 – Diagrama de controle das fontes.....	50
Figura 5.3 – Interface gráfica das fontes.....	51
Figura 5.4 – Dados gerados pelo programa de aquisição.....	52
Figura 5.5 – Diagrama de controle das baterias e tensão da carga.....	52
Figura 5.6 – Interface do módulo carga de baterias e tensão do barramento principal	53
Figura 5.7 – Dados de tensão das fontes, barramento e baterias.....	53
Figura 5.8 – Análise de funcionamento das fontes.....	54
Figura 5.9 – Potência máxima e modulação.....	55

Figura 5.10 – O HCC no gerador eólico.....	55
Figura 5.11 – Tensões e potência das fontes.....	56
Figura 5.12 – Ajuste de tensão na carga.....	57
Figura 5.13 – Ajuste da resistência de carga.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E LETRAS GREGAS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
C_c	Corrente contínua
hfac	Corrente alternada de alta frequência
CSCC	Fontes de corrente controladas por corrente
f	Número de pares de pólos
N_s	Velocidade angular do campo girante
rpm	Rotações por minuto
Q_c	Potência reativa capacitiva
Q_{mag}	Potência reativa indutiva
Hz	Hertz
V_c	Tensão sobre o capacitor
X_c	Reatância capacitiva
I_c	Corrente sobre o capacitor
V_F	Tensão de fase
V_L	Tensão de linha
π	Constante PI
C	Capacitância
HCC	"Hill Climbing Control"
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I	Corrente
V	Tensão
F_f	Fator forma
$V_{\max P}$	Tensão de máxima potência

$I_{\max P}$	Corrente de máxima potência
R_s	Resistência série
R_p	Resistência em paralelo
I_L	Corrente de carga
I_s	Corrente série
I_p	Corrente paralelo
I_D	Corrente no diodo
I_o	Corrente de saturação reversa do diodo
e	Carga do elétron
m	Fator de idealidade do diodo
k	Constante de Boltzmann
T_{cel}	Temperatura absoluta da célula fotovoltaica
N_s	Número de células em série
e	Base do logaritmo neperiano
t	Tempo
R	Resistência
A	Ampères
V_i	Tensão de entrada
V_o	Tensão de saída
f_c	Frequência de corte
WES	Wind Energy System – Gerador Eólico
PV	Photovoltaic - Gerador Fotovoltaico
K	Índice de capacidade das baterias
Ah	Ampères-hora
W	Watts
Bat	Banco de baterias
Ω	Ohms
D	Razão cíclica
T	Temperatura

PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulsos)
CA	Corrente Alternada
MOSFET	Metal-oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
A/D	Conversor analógico para digital
D/A	Conversor digital para analógico
CI	Circuito Integrado
F	Faraday
H	Henry

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice I – Software de controle do sistema.....	65
Apêndice II – Controle das baterias, fontes e carga principal.....	78

LISTA DE ANEXOS

Anexo I – Diagrama de blocos do PIC18F452.....	80
Anexo II – Pinagem do PIC18F452.....	81
Anexo III – Driver de potência UC3708.....	82
Anexo IV – Tabelas de características do PIC18F452.....	83

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS.....	vii
LISTA DE APÊNDICES	x
LISTA DE ANEXOS	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	
1.1 – INTRODUÇÃO	1
1.2 – ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	4
1.3 – RESUMO DO CAPÍTULO.....	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 – INTRODUÇÃO	6
2.2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.3 – RESUMO DO CAPÍTULO	9
CAPÍTULO 3 – INTEGRAÇÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	
3.1 – INTRODUÇÃO	10

3.2 – FORMAS DE INTEGRAÇÃO DE FONTES DISTINTAS DE ENERGIA NO BARRAMENTO ELÉTRICO.....	10
3.3 – NECESSIDADE DE CONTROLE INDIVIDUAL DAS FONTES.....	11
3.3.1 – Dimensionamento do Gerador de Indução	11
3.3.2 – Dimensionamento do Banco de Capacitores para Excitação	12
3.4 – O MÓDULO FOTOVOLTAICO	15
3.4.1 – Efeitos da Radiação	16
3.4.2 – Efeitos da Temperatura.....	16
3.5 – MODELO EQUIVALENTE DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	18
3.5.1 – Otimização da Potência Gerada nos Painéis Fotovoltaicos.....	20
3.6 – DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS	23
3.7 – RESUMO DO CAPÍTULO	25
CAPÍTULO 4 – DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE	
4.1 – INTRODUÇÃO	26
4.2 – O GERADOR EÓLICO.....	26
4.2.1 – Controle do Gerador Eólico.....	27
4.2.2 – Aquisição dos sinais de Tensão e Corrente	28
4.3 – O GERADOR FOTOVOLTAICO.....	30
4.3.1 – O Controle do Gerador Fotovoltaico	30
4.4 – O BANCO DE BATERIAS.....	31
4.5 – O CONTROLE DA TENSÃO NA CARGA PRINCIPAL	33
4.6 – O ALGORITMO "HILL CLIMBING CONTROL"	35
4.7 – O MICROCONTROLADOR UTILIZADO.....	35

4.8 – O FLUXOGRAMA DE CONTROLE DOS MÓDULOS GERADORES..	36
4.9 – O CONTROLE DO BANCO DE BATERIAS E TENSÃO CARGA PRINCIPAL	37
4.10 – A MODELAGEM DO CONVERSOR	39
4.11 – A MONTAGEM DO PROTÓTIPO DO MÓDULO CONTROLADOR.	42
4.12 – RESUMO DO CAPÍTULO	47
CAPÍTULO 5 – TESTES EXPERIMENTAIS DOS CIRCUITOS E SOFTWARE DE CONTROLE	
5.1 – INTRODUÇÃO	48
5.2 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO.....	48
5.3 – O MÓDULO PRINCIPAL	49
5.4 – O SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	50
5.5 – A POTÊNCIA DAS FONTES	54
5.6 – A REGULAGEM DA TENSÃO NA CARGA.....	56
5.7 – RESUMO DO CAPÍTULO	58
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	
6.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
6.2 – PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	59
6.3 – SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DESTE TRABALHO.....	60
6.4 –RESUMO DO CAPÍTULO	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O aproveitamento de fontes alternativas de energia é um conceito recente. Historicamente, até que a energia elétrica fosse introduzida como alternativa economicamente viável para a energia aproveitada do carvão, recursos hídricos, aquecimento direto etc., era gerada localmente, ou o mais próximo da carga. Esta característica se alterou com a chegada da geração em grande escala, onde a energia produzida na usina contribui parcialmente com um sistema energético interligado.

A integração de fontes renováveis de energia é um assunto atualmente muito discutido pelos pesquisadores, tal interesse advém da necessidade de serem desenvolvidas novas opções que possam suprir os sistemas convencionais, que atuam em seus limites de geração.

Reservas de energia são necessárias, de preferência através de fontes alternativas, pois se percebe que os impactos ambientais e custos de transmissão e distribuição para grandes barragens são elevados. Além disso, a geração de energia pela queima de combustíveis fósseis mostra-se poluente e onerosa.

Os pequenos aproveitamentos descentralizados para regiões, que apresentem condições afins de geração e consumo, como por exemplo, em áreas remotas, a geração distribuída (GD) apresenta a grande vantagem de fixar o homem no campo, promovendo o desenvolvimento econômico e social sustentável de regiões não atendidas pelos sistemas convencionais de geração e transmissão de energia. A sua instalação simples, e principalmente a facilidade de expansão do sistema, além de apresentar grande confiabilidade, fazem essa possibilidade plenamente viável por descentralizar a geração, aproximando-a dos pequenos centros de consumo. Ao contrário das grandes centrais, a geração distribuída torna viável também o

aproveitamento local das quantidades de calor usualmente existentes em todas as formas de conversão energética e, como conseqüência, aumentam o rendimento da conversão.

Por outro lado, a evolução da microeletrônica tornou possível a minimização e permitiu a resposta rápida dos circuitos de controle desses processos, reduzindo em muito o custo dos equipamentos, tornando assim ainda maior eficiência do processamento de energia. Em face disso, as fontes renováveis já se tornaram opções atrativas, pois os investimentos para implantação dos pequenos aproveitamentos podem ser relativamente baixos e gradativos, além do fato destas pequenas centrais necessitarem de manutenção simples, tais como a limpeza da superfície dos painéis fotovoltaicos.

A GD é um assunto muito atual e de interesse nacional, e leva os profissionais da área a admitirem que os próximos anos vão ser caracterizados pela diversificação das fontes de energia. A necessidade da descentralização da produção através da geração distribuída faz com que as atenções se voltem para o projeto, desenvolvimento e instalação de micro-redes que possam atender pequenos grupos de usuários por sistemas híbridos, aumentando a confiabilidade do sistema de GD através de energias alternativas. Em vista disso, notamos que as soluções de grande porte envolvem grandes investimentos, com longos prazos de retorno do capital. O conjunto de soluções em pequena escala, múltiplas e localizadas representa maior flexibilidade nos investimentos, agregando além dos menores custos, modularidade e, sem dúvida, menores riscos. Portanto, a geração distribuída por meio de fontes alternativas de energia, apresenta características afins com a atual necessidade energética brasileira. As técnicas disponíveis para maximizar o aproveitamento das fontes primárias e a integração de fontes alternativas de energia motivaram esta dissertação.

Por ser um sistema modular, com plenas possibilidades de inserção de novas fontes de geração, os problemas de compatibilização de tensão entre fontes conectadas em paralelo podem ser contornados pela transformação de cada fonte primária numa fonte de corrente. Com isto, níveis desiguais de tensão são evitados e deixam de acarretar a circulação de correntes indesejáveis que aconteceria pelos níveis distintos das fontes de tensão. Isto é, o barramento torna-se um nó de corrente, para onde convergem todas as correntes individuais das fontes, e cujo somatório comporá a corrente total do barramento, conforme a "Lei das correntes de Kirchoff". Por sua vez, o controle de tensão na carga principal deve também ser garantido para que o sistema possa ter confiabilidade. Isto é obtido pelo controle da corrente ou pela modulação da carga

secundária em paralelo com a carga principal, obedecendo a "Lei de Ohm". A modulação de corrente na carga secundária poderia provocar desperdícios de potência. Então a energia para a carga secundária deve ser aproveitada para diversos fins como aquecimento, resfriamento, armazenamento para reserva de energia, produção de hidrogênio, retro-bombeamento ou mesmo aproveitamento direto.

Um aspecto importante das energias renováveis é a disponibilidade energética das fontes primárias, que são variáveis e dependem da existência de energia primária como a vazão hídrica a fio d'água, a radiação solar, o vento, etc. isto é, elas necessitam de reserva energética. O modo mais comum de suprir a energia necessária na ausência de fontes primárias se dá através da energia acumulada em bancos de baterias. No presente trabalho foram utilizadas baterias chumbo-ácido, por serem as de menor custo e serem facilmente obtidas no mercado. Essas baterias requerem certos cuidados para garantir seu bom funcionamento. Dentre estes citamos a conservação do nível e densidade da solução do eletrólito interno, limpeza dos contatos e bornes, evitar umidade, e operação em temperaturas extremas, entre outros.

Pelas razões acima expostas e em particular, a proteção do banco de baterias é prevista e tratada como assunto de grande importância neste trabalho. Para tal, utiliza-se um sensor para monitorar os valores de tensão nos terminais do banco, garantindo que não se excedam os valores limites. A profundidade de descarga em nenhum momento é excedida, pois isso acarretaria em diminuição da vida útil do banco de baterias, ao mesmo tempo em que a tensão máxima é limitada para que essas baterias nunca cheguem ao valor da tensão de evaporação ocorrido na sobrecarga. Assim, conforme a capacidade do banco de baterias, da qual depende o suprimento de energia na ausência das fontes primárias, tem-se determinados valores de corrente de carga e descarga máximos que não devem ser excedidos.

Em se tratando das fontes de geração, com suas características distintas de geração e de variação das grandezas de saída, que têm como base as condições das fontes primárias, torna-se fundamental que cada fonte seja usada no seu ponto de máxima potência recebendo, portanto, abordagem individualizada.

Esta seria uma tarefa difícil, se não fosse a possibilidade de utilização de microcontroladores de última geração, que nos trazem a vantagem de agregar circuitos internos diversos, minimizando o aparato eletrônico ao mesmo tempo em que diminui o custo e imprime rapidez aos processos.

O monitoramento do sistema do sistema acima descrito facilita o acompanhamento do funcionamento do sistema, extração de relatórios, e avaliação da sua dinâmica.

Uma outra questão é a mostra visual as grandezas oriundas dos sensores e das diversas etapas do processo, que se torna complexa pelas dificuldades de detecção e registro de defeitos no protótipo. Para isto, é importante que se pense na composição de um banco de dados da geração de potência que torne disponível a determinação do rendimento e, também, para avaliação do tipo de fonte primária que apresente melhores resultados no local. Tais dados facilitariam a previsão da expansão do sistema.

A temática desta dissertação está organizada em 6 capítulos, que são descritos a seguir.

1.2 Organização dos Capítulos

No capítulo 1, inicialmente resumiu-se o estado da arte e as possibilidades de descentralização da produção de energia elétrica para justificar o desenvolvimento e análise do desempenho de um módulo que integrasse as formas mais conhecidas de geração de energia utilizando tecnologia sedimentada e de fácil obtenção no mercado.

No capítulo 2, temos a revisão bibliográfica, onde comparamos diversos trabalhos na área e os seus respectivos métodos e vantagens. No final do capítulo, faz-se a comparação e estabelecem-se diferenças entre os trabalhos já efetuados e a proposta deste trabalho.

No capítulo 3, estabelece-se a necessidade de integrar as fontes de geração de energia, bem como, trata-se dos aspectos fundamentais que devem ser considerados em cada fonte. Caracteriza-se o gerador de indução e também o fotovoltaico, bem como as principais variáveis envolvidas nesses processos. Também, neste capítulo são citados os principais cuidados na utilização e manutenção dos bancos de bateria chumbo-ácido, que, pelo seu custo, são as mais comumente utilizadas.

No capítulo 4, descreve-se o modelo, as variáveis e limites de cada fonte de geração utilizada como base para a simulação do processo. São descritos os sensores utilizados e a forma de controle de tensão na carga principal. Estão descritos o algoritmo "Hill Climbing Control" e o modo de controle utilizado. Descreve-se o microcontrolador utilizado e suas características principais e apresenta-se o fluxograma de controle dos

módulos e também o fluxograma de controle da tensão na carga principal e banco de baterias. Também, é descrita e mostrada a parte física do módulo implementado.

No capítulo 5, temos o resultado dos testes experimentais dos circuitos e software de controle. São apresentados os diagramas e telas de interface, bem como os resultados obtidos.

No capítulo 6, além das conclusões desta dissertação, apresentam-se as principais contribuições e as sugestões para continuação do trabalho.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Experiências como as do racionamento de energia elétrica no ano de 2001 no Brasil demonstraram que a dependência quase que exclusiva da hidroeletricidade pode trazer grandes problemas. Para elaboração desta dissertação foram desenvolvidas atividades relacionadas ao estudo e desenvolvimento de um módulo confiável para controle das fontes alternativas de energia. Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico a respeito dos principais temas que seriam abordados nesta dissertação e que serão discutidos a seguir.

2.2 Revisão Bibliográfica

O estudo das fontes renováveis como forma de geração alternativa tem como objetivo desenvolver tecnologias e métodos de aplicação que viabilizem o aproveitamento de pequenas fontes energéticas. Podemos citar entre elas, a geração eólica, a geração hídrica e também a geração de energia solar.

No trabalho, caracterizamos vários tipos de fontes de geração, bem como seus parâmetros individuais, limites tecnológicos, modelo matemático e modelo reduzido. Por não possuírem reservas próprias, exceto as baterias, essas fontes alternativas necessitam que se aproveite a máxima potência disponível. FARRET e BUENO [17] propõem um protótipo de microcentral conectada à rede pública com controle eletrônico pela carga. Um microprocessador controla e aciona o sistema procurando produzir e fornecer à rede a máxima potência disponível na fonte primária. FARRET [2] também detalha uma central eólica e as técnicas de controle mais comumente utilizadas.

PFITSCHER [7] analisa as formas de direcionamento ativo de turbinas eólicas de eixo horizontal sem a utilização de sensores. Para isso, implementou-se um controlador que utiliza o método da subida de encosta ("Hill Climbing Control"), que foi abordado por RICH [4]. Esse método é a maneira mais simples de se efetuar o controle de carga, conforme PORTOLANN [1] e FARRET [2].

RIGHI [5], propõe a conexão de fontes renováveis de energia com um controle de geração unificado. Observou a tendência do controle sobre a carga dos geradores por estas terem maior efeito sobre as variáveis tensão, velocidade, corrente, etc., em máquinas de maior potência. CHIANG *et al.* [32] e esta referência, afirmam que a conexão de fontes em paralelo no lado cc do barramento permite o aumento de potência, ao nível de tensão desejado, sendo que permite a instalação de várias linhas de corrente contínua, que podem partir de locais de geração afastados convergindo para um único ponto. Isso faz com que a quantidade de energia captada de várias fontes seja melhor aproveitada e, no mínimo, igual à um dispositivo de geração único e de capacidade igual à soma de vários geradores. Quando houver na associação vários geradores de indução, ou mesmo módulos fotovoltaicos, não haverá motorização, pois o sentido das tensões e das correntes é fixado pela retificação e diodos barram a corrente reversa em cada fonte.

BUEHRING [6] analisa métodos de otimização do aproveitamento de energia eólica para controle da potência gerada através do controle da carga, onde a realimentação baseia-se no sinal de potência e no método "Hill Climbing Control" [1][2][4].

SCHUCH [8], implementou um conversor PWM bidirecional para interfacear o barramento cc e o banco de baterias. Ele define frequências de chaveamento baseadas nos níveis de potência e de tensão nas cargas.

RINKIEWICZ [12] estudou o comportamento dinâmico das baterias devido às suas reações químicas não lineares. Os fatores que provocavam isso comprovadamente eram o nível de carga ou descarga, temperatura, tempo de uso, e alguns outros fatores. Em função de todas essas reações, não é muito simples modelar-se uma bateria. Para isso existem ensaios apropriados e também se pode fazer a modelagem a partir de aproximações e coeficientes empíricos.

Os estados de carga e descarga de baterias, bem como a sua tensão de flutuação, são discutidos pela SIEMENS [13]. Esse estudo foi abordado por VUTETAKIS [14], que diz que quando ocorrer descarga profunda em baterias chumbo-ácido, a melhor

maneira de recuperar a capacidade da bateria é recarregá-la com a corrente máxima permitida pelo fabricante, pois assim a vida útil da mesma será prolongada.

MELLO JR [18] aborda os aspectos de controle de conversão de energia com geradores de indução de frequência variável. Esta referência propõe alternativas para melhor operação de uma microcentral assíncrona com controle adaptativo pela carga, utilizando o método da subida da encosta [1] [2] [4]. Também compara os métodos de incremento fixo e adaptativo da corrente gerada, do mesmo modo que FARRET [2].

A proposta do presente trabalho é o tratamento das diversas fontes de energia como fontes de corrente de máxima potência, pois isso respeita as características individuais das várias fontes de energia envolvidas no processo de geração, facilitando com isso a inclusão de novas fontes de geração.

O modo de controle aproveita a sugestão de RIGHI [5] pela convergência energética das fontes a um único barramento de corrente contínua, mas difere no controle, pois utiliza o controle de potência independente, aproveitando o método “Hill Climbing Control” proposto por FARRET e BUENO [17], RICH [4], PORTOLLAN [1] e FARRET [2]. Utiliza também o método de controle com incremento fixo analisado por FARRET [2] e MELLO JR. [18].

A utilização de microcontroladores de última geração faz com que a parte física do sistema seja enormemente minimizada e os controles sejam efetuados em tempos mínimos [34].

A eficiência da conversão da energia advinda das fontes alternativas deve ser maximizada, HUA e SHEN [31], KOUTROULIS e KALAITZAKIS [35], indicaram em estudo, que o conversor *buck* apresenta maior eficiência energética quando comparado ao *boost*, *buck-boost*, em regime similar de operação.

O controle da tensão na carga principal equaliza as tensões das fontes, facilitando o controle independente das correntes de máxima potência que fluem para o barramento.

NUNES e BEZERRA [22] analisam como o valor da carga e o fator de potência da mesma influenciam na frequência e na tensão do gerador de indução, assim como apresentam como uma solução viável à inserção de capacitores em série com o gerador. Este método não foi utilizado neste trabalho, pois não foi feito neste momento um estudo baseado nas características da carga.

VALLE e BEZERRA [23] fazem uma comparação na viabilidade técnica e econômica entre a integração de fontes energéticas, bem como a inserção de um módulo

de células de combustível num sistema híbrido. Essa possibilidade foi considerada importante, bem como foi sugerida ao final deste trabalho.

2.3 Resumo do Capítulo

Neste capítulo, a partir da análise do trabalho de diversos autores na área da energia alternativa, procurou-se fazer comparações e estabelecer diferenças em relação à proposta ora apresentada. Cabe frisar que todos estes trabalhos serviram como base para o desenvolvimento desta dissertação, onde tivemos como objetivo principal promover avanços tecnológicos em relação a eles.

Integração das Fontes Alternativas de Energia

3.1 Introdução

A geração descentralizada ou distribuída consiste numa possibilidade real para a eletrificação rural, para pequenas empresas ou para locais remotos, onde os custos de extensão e perdas de longas redes de distribuição são elevados. Eventualmente, os sistemas de geração descentralizados podem incorporar micro-redes. As micro-redes são um conjunto de geradores, de tecnologias distintas ou não, isolados ou integrados, atendendo um grupo de usuários em determinada região ou veículo. Neste tipo de configuração, a integração das fontes de geração, eventualmente através de sistemas híbridos, representa um grande campo para desenvolvimento e otimização de sistemas de energia como um todo.

3.2 Formas de integração de fontes distintas de energia no barramento elétrico

As fontes de energia alternativa podem ser integradas em módulos, onde fontes semelhantes contribuem para o suprimento de determinada carga, ou entre diferentes tipos, em ambos casos há a possibilidade de integração ao sistema de distribuição. Para a integração de fontes distintas, usualmente opera-se em corrente contínua (CC) [5] e [32]. A transmissão pode se dar em CC ou corrente alternada (CA), barramento de corrente alternada (CA) comercial ou barramento de corrente alternada de alta frequência (HFAC).

Existem aspectos fundamentais a serem considerados nas diversas formas de geração de energia. Aspectos dinâmicos de funcionamento, como tensão nominal, frequência, tipo de fonte primária, etc., estabelecem diferenças básicas nas estratégias

de controle de cada fonte. Por isso, existe a necessidade de um controle individual de geração para cada fonte.

3.3 Necessidade de controle individual das fontes

Cada tipo de fonte geradora de energia, seja ela hídrica, térmica, eólica, solar, células de combustível, etc., apresenta dinâmica peculiar de funcionamento, influenciando características construtivas, resposta à transitórios, disponibilidade da fonte primária. Tais características devem ser conjugadas de modo a determinar se operarão em série ou paralelo, visando obter o máximo de resultado possível em termos de energia confiável. Dessa forma, o algoritmo de controle deve levar em conta estas características individuais dos módulos geradores [2].

O tratamento individual obedecendo às características dos geradores faz-se necessário também devido ao comportamento aleatório de cada fonte primária, ou seja, variação da intensidade do vento, da radiação solar, da vazão no caso de gerador hídrico, de tal forma que produzem tensões distintas em cada fonte. Por esse motivo, o paralelismo das fontes requer cuidados para que não circulem correntes entre as fontes.

Nesta dissertação, propõe-se um sistema de paralelismo, transformando cada fonte primária numa fonte de corrente controlada por corrente (CSCC). A situação de tensões desiguais entre as fontes fica contornada mediante a conversão de cada fonte alternativa em fonte de corrente que em conjunto são injetadas diretamente no barramento principal que funcionam como nó de corrente.

A tensão na carga é estabilizada pela modulação da carga secundária, tal que:

$$V_L = I_S \cdot R_L \quad (3.1)$$

Onde: V_L é tensão na carga, I_S é corrente resultante do somatório das contribuições das fontes de corrente e R_L é a resistência equivalente a ser modulada.

3.3.1 O Dimensionamento do Gerador de Indução

O suprimento de energia pode advir de fontes ou armazenamentos estáticos ou rotativos. No caso das fontes alternativas, o gerador de indução quase sempre é a fonte preferida.

Como nesta dissertação é usado um protótipo para ilustrar o princípio do barramento de corrente para as fontes primárias e de tensão para as cargas, foram selecionadas as seguintes para as fontes: eólica, fotovoltaica e banco de baterias.

O gerador de indução é uma máquina que quando é auto-excitada por uma fonte de energia reativa capacitiva torna-se capaz de gerar potência elétrica. O rotor do gerador pode ser acionado por uma turbina qualquer, por exemplo, a eólica. Nessa operação, a tensão e a frequência são funções da excitação, do fator de potência, e das características da carga. Porém, o gerador de indução apresenta como vantagem em comparação com os geradores síncronos, pouca manutenção, robustez, proteção natural contra sobrecorrentes ou curtos-circuitos e, também, baixo custo.

Em áreas remotas ou para os pequenos autoprodutores, podem ser utilizados geradores de pequeno porte com turbinas de passo fixo, onde a velocidade e frequência são variáveis, possuindo regulação de tensão deficiente. O controle eletrônico pela carga parece ser a alternativa mais viável para integração de centrais deste porte.[1]

3.3.2 – Dimensionamento do Banco de Capacitores para Excitação

A máquina de indução operando como gerador auto-excitado envolve a utilização de circuitos magneticamente não lineares. Para descrevê-los, existem diversos modelos matemáticos que podem ser utilizados, uns mais complexos, outros menos. No modelo proposto nesta dissertação e de forma simplificada, considerando-se determinadas tensão e frequência nominais, pode-se chegar a um valor bem aproximado da capacitância necessária ao banco de capacitores.

A frequência síncrona de operação f é dada por:

$$f = \frac{N_s \cdot P}{120} \quad (3.1)$$

Sendo P é número de pares de pólos do enrolamento da armadura do estator, e N_s a velocidade angular do campo girante, fornecida em RPM.

A potência reativa capacitiva do banco de capacitores deve ser igual à potência reativa indutiva solicitada pela estrutura magnética do gerador para sua excitação, assim escreve-se:

$$Q_C = Q_{mag} \quad (3.2)$$

Conforme o enrolamento da máquina, o banco vai trabalhar com três capacitores ligados em Y, onde cada capacitor é responsável por 1/3 da potência reativa inserida no circuito.

$$Q_{C1} = \frac{Q_{mag}}{3} \quad (3.3)$$

Como os capacitores industriais, nas frequências de 50 e 60Hz tem perdas desprezíveis, podemos escrever:

$$V_c = X_c \cdot I_c \quad (3.4)$$

sendo X_c a reatância capacitiva numa fase da ligação em Y, V_c a tensão aplicada sobre o capacitor, que é igual à tensão de fase e relacionada com a tensão de linha por $\sqrt{3}$, e I_c , a corrente que circula pelo referido capacitor.

$$V_c = V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

Portanto:

$$Q_{C1} = \frac{Q_{mag}}{3} \quad (3.6)$$

em que:

$$V_c \cdot I_c = \frac{Q_{mag}}{3} \quad (3.7)$$

e

$$V_C \cdot \frac{V_C}{X_C} = \frac{Q_{mag}}{3} \quad (3.8)$$

ou ainda:

$$\frac{V_C^2}{\frac{1}{2\pi f C}} = \frac{Q_{mag}}{3} \quad (3.9)$$

que resulta em:

$$C = \frac{Q_{mag}}{2\pi f \cdot V_L^2} \quad (3.10)$$

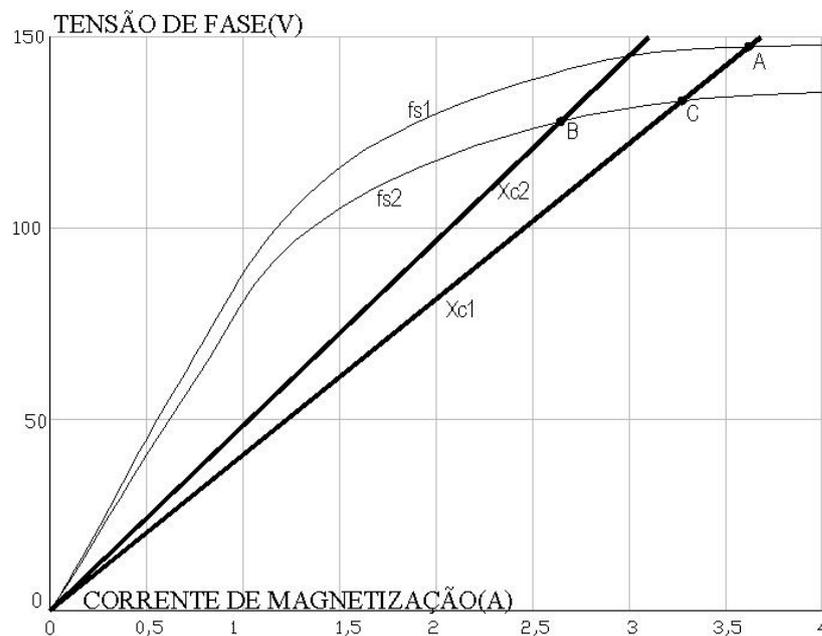


Figura 3.1: Característica de magnetização do gerador de indução

Tais cálculos permitem determinar a capacitância necessária para a auto-excitação da máquina operando como gerador. Esse valor de capacitância somente é válido para tensão e frequência nominais. Para toda e qualquer alteração na frequência

do gerador, é alterada sua reatância, o que afeta diretamente as características de magnetização da máquina, bem como a tensão de saída.

A característica de magnetização de um gerador alternado a ímãs permanentes está representada na figura 3.1.

Para cargas resistivo-indutivas, (sub-excitação), observa-se uma razoável queda de tensão nos terminais do gerador. Para cargas resistivo-capacitivas (sobre-excitação), a tensão nos terminais cresce.

Uma alternativa utilizada para a regulação da tensão pode ser o chaveamento de bancos discretos de capacitores utilizando para isso relés ou chaves semicondutoras. Essa técnica apresenta como desvantagem a necessidade de existir uma ampla faixa de valores de potência reativa necessária para manter a regulação de tensão. Além disso, constata-se a correção de tensão de saída aos saltos e uma elevação excessiva da corrente de magnetização para manter a tensão terminal, pode acarretar em saturação do gerador e a conseqüente distorção da forma de onda da tensão, uma segunda alternativa é o ajuste da velocidade do gerador.

Apesar da melhoria na tensão de saída do gerador de indução com essa técnica, sua frequência síncrona permanece variável. Por esse motivo, optou-se por efetuar a retificação da tensão de saída, de modo a compatibilizar o sentido de corrente com as outras fontes.

Por intermédio do algoritmo “Hill Climbing Control”, o ponto de máxima potência é determinado para cada fonte individualmente. Esse valor de potência determinará a corrente que será injetada no barramento, para cada fonte funcionando como fonte de corrente. Não há, portanto, preocupação com a tensão produzida pelo gerador nesse momento, pois ele é tratado como uma fonte de corrente.

3.4 O Módulo Fotovoltaico

Na geração de energia através de painéis fotovoltaicos, tem-se que levar em conta dois fatores fundamentais para a determinação das características operacionais das células, que são: I_{sc} (corrente de curto circuito) e V_{oc} (tensão de circuito aberto). Esses são os valores máximos de cada célula e abaixo dos quais incidirão os valores nominais de corrente e tensão em operação normal.

3.4.1 Efeitos da Radiação

A irradiância afeta diretamente a corrente de curto circuito, cujo valor varia proporcionalmente à radiação. Já a tensão de circuito aberto é pouco influenciada pela radiação, como podemos observar na figura 3.2.

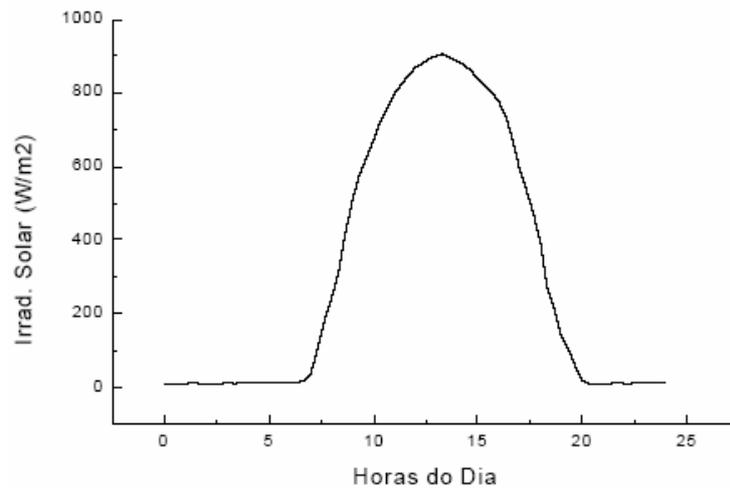


Figura 3.2: Distribuição da Radiação ao Longo do dia

Esses valores de referência de tensão e corrente da célula são afetados pela irradiância e, em muito menor escala, pela temperatura.

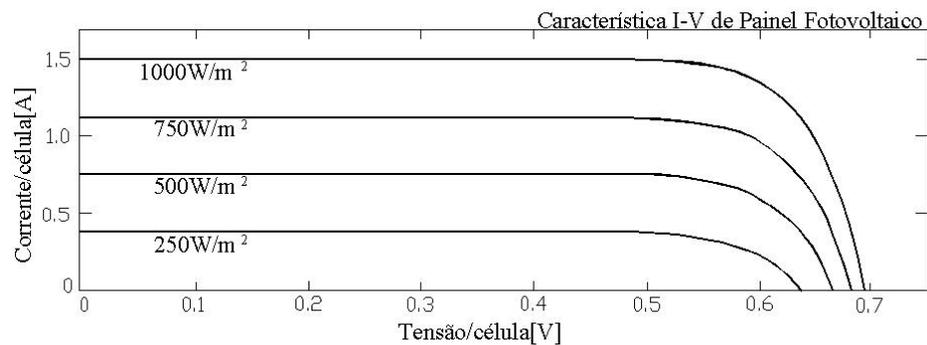


Figura 3.3: Efeitos da intensidade luminosa

3.4.2 Efeitos da Temperatura

A corrente de curto-circuito I_{sc} apresenta um ligeiro incremento com o aumento da temperatura. No entanto, a tensão de circuito aberto V_{oc} é afetada diretamente pela

temperatura. Essa diminuição de V_{oc} altera toda a curva, onde se pode perceber na figura 3.4, que a célula apresenta visível perda de potência.

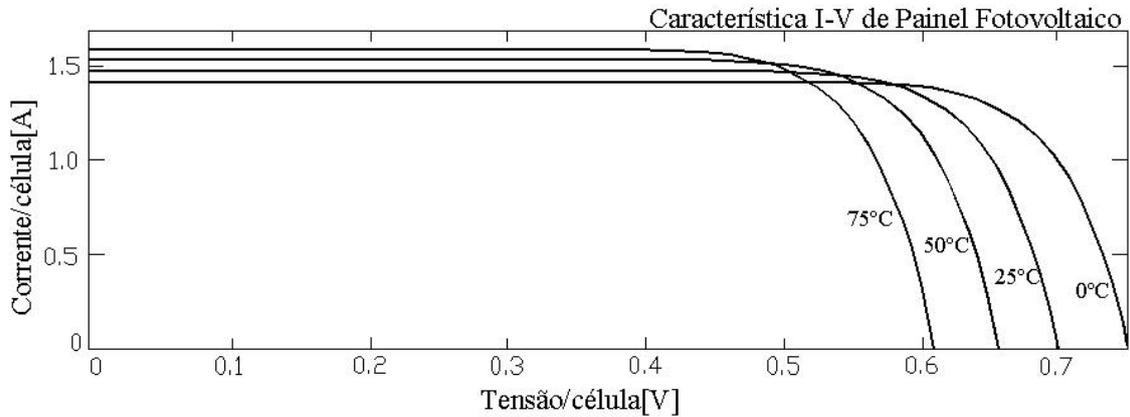


Figura 3.4: Efeito da variação da temperatura

Percebe-se nitidamente que a curva operacional da célula desloca-se verticalmente com a variação da radiação e horizontalmente, com a variação da temperatura, portanto, para cada situação de radiação e temperatura, temos um ponto distinto que representa a potência máxima possível de ser gerada naquela condição.

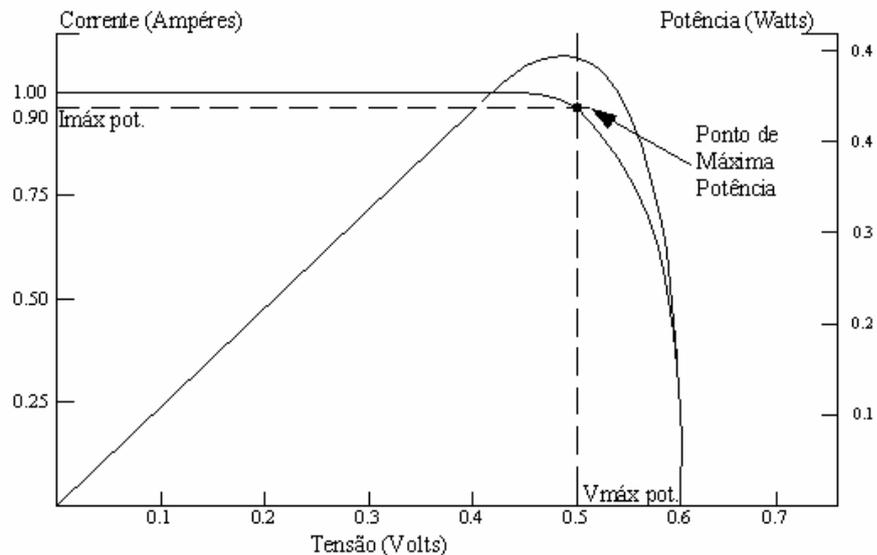


Figura 3.5: Características elétricas dos módulos

O fator de forma representado pela linha pontilhada na figura 3.5, é uma grandeza importante que expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama $I \times V$. Quanto melhor a qualidade das células mais próxima da unidade será esse fator.

$$F_f = \frac{V_{\max P} \cdot I_{\max P}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.11)$$

A equação 3.11 demonstra claramente que o ponto de máxima potência depende numa razão de proporção inversa à corrente de curto circuito (I_{sc}) e tensão de circuito aberto (V_{oc}), portanto, é influenciado enormemente pela temperatura dos módulos.

3.5 Modelo Equivalente do Módulo Fotovoltaico

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica isolada consiste em um gerador de corrente constante em paralelo com uma junção pn , que atua como um diodo polarizado positivamente. Temos também uma resistência série R_s , que representa a resistência efetiva da célula, como mostra a figura 3.6 A resistência em paralelo R_p , é associada às correntes de fuga, principalmente pelas bordas da célula ou microfissuras. Ambas as resistências contribuem para a degradação do fator de preenchimento do gerador fotovoltaico, o que favorece a redução da potência de saída.

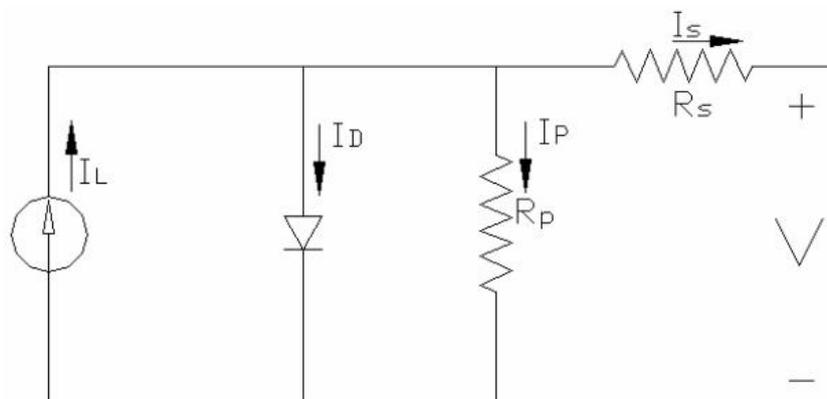


Figura 3.6: Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

No circuito da figura 3.6, tem-se que:

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (3.12)$$

A corrente que flui pelo diodo, como função da tensão pode ser expressa por:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(V + IR_s)}{mkT_{cel}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.13)$$

onde I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro, V é a tensão aplicada aos terminais do diodo, e é a carga do elétron, m é o fator de idealidade do diodo (entre 1 e 2 para o silício monocristalino), k é a constante de Boltzmann, T_{cel} é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica, R_s e R_p são, respectivamente, as resistências série e paralelo.

Quando se tem apenas módulos com células conectadas em série, a equação anterior fica acrescida de um termo N_s , que representa o número de células em série.

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(V + IR_s)}{N_s mkT_{cel}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.13)$$

A resistência série de uma célula fotovoltaica é composta de três elementos: a resistência do silício, a resistência de contato entre o silício e a metalização da célula e, também, a própria resistência da metalização. No caso de um módulo, onde se tem a associação de várias células em série, somam-se aos componentes anteriores, a resistência dos condutores metálicos entre as células, incluindo a solda e a resistência dos bornes.

A resistência paralela é determinada pelas fugas nas bordas da célula. Defeitos mínimos no cristal, decorrentes do processo de fabricação, podem provocar curtos-circuitos. Valores baixos da resistência paralela são caminhos alternativos para a corrente fotogerada, o que reduz a corrente de saída produzida pela célula, diminuindo a tensão da mesma.

3.5.1 - Otimização da potência gerada nos painéis fotovoltaicos.

O ponto de operação de qualquer sistema de energia, é definido pela interseção da curva característica da fonte e carga. As curvas de $I \times V$ e $P \times V$ de um sistema fotovoltaico, são ilustrados na figura 3.7. Se por exemplo, estivermos atendendo a carga R_1 , a unidade de geração no ponto A_1 . Se a resistência de carga se alterar para R_2 ou R_3 , o ponto de operação se deslocará para A_2 e A_3 , respectivamente. Notamos que a máxima potência extraída do módulo se dá quando é atendida a carga de valor R_2 (3.7 (b), desconsiderando-se variações climáticas), sendo o ponto ótimo de operação localizado em A_2 . Tal acoplamento com a carga é necessário para máxima extração de potência do módulo de geração fotovoltaico.

A operação com cargas constantes é mostrada em 3.7(c) e (d). A linha de potência constante possui dois pontos de interseção com a curva de geração, denotados por B_1 e B_2 . Apenas o ponto B_2 é estável, qualquer perturbação no sistema forçará o sistema voltar a B_2 . A condição necessária para operação estável de um sistema fotovoltaico, se comporta como a equação abaixo.

$$\left[\frac{dP}{dV} \right]_{carga} > \left[\frac{dP}{dV} \right]_{fonte} \quad (3.14)$$

Algumas cargas como aquecedores possuem resistência constante, com a potência variando com o quadrado da tensão ou corrente. De outra maneira, algumas cargas como motores de indução, se comportam como cargas de potência constante, exigindo mais corrente em tensões mais baixas. Na maioria dos sistemas, com cargas mistas, a potência varia em proporção linear com a tensão.

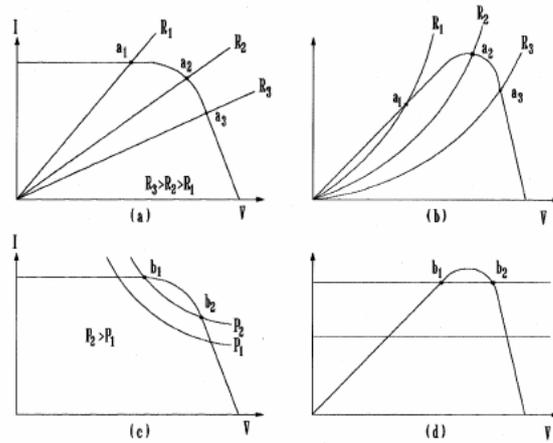


Figura 3.7 – Estabilidade operacional e adaptação à carga com a potência constante

Para operação em pico de potência, seja a tensão de operação V e I a corrente do sistema caracterizados pela curva $i-v$, a potência gerada é dada por

$$P = V \cdot I \quad (3.16)$$

Se por motivos climáticos, o ponto de operação se deslocar de tal maneira que a corrente atual é $I + \Delta I$, analogamente a tensão será $V + \Delta V$, o novo ponto de operação será:

$$P + \Delta P = (V + \Delta V) \cdot (I + \Delta I) \quad (3.17)$$

Rearranjando, desconsiderando o termo P , por ser insignificante.

$$\Delta P = (I \cdot \Delta V) + (V \cdot \Delta I) \quad (3.18)$$

No topo de curva $p-i$, onde está localizado o ponto de máxima potência, ΔP tem de ser zero. De tal forma, limitando o ponto de operação à vizinhança plana da curva.

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (3.19)$$

$$Z_d = \frac{dV}{dI} \quad \text{e} \quad Z_s = \frac{V}{I} \quad (3.20)$$

Chamamos o primeiro termo impedância dinâmica da carga, e o termo da direita, impedância estática.

Existem três métodos para extrair a máxima potência de uma unidade de geração fotovoltaica, e estão abaixo descritos:

1. Um pequeno sinal de corrente é periodicamente injetado no barramento e são medidas a impedância dinâmica e estática. A tensão de operação é aumentada ou decrementada até $Z_d = -Z_s$. Neste ponto, é extraída a máxima potência do sistema fotovoltaico.
2. Outro método consiste no aumento da tensão de operação até que dP/dV seja positivo. Isto é, a tensão é aumentada até conseguirmos extrair mais potência. Se dP/dV for negativo, a tensão de operação é diminuída. A tensão então, é adequada de maneira a forçar dP/dV ser o mais próximo de zero possível.
3. O terceiro método se vale do fato que a tensão no máximo ponto de operação é relacionada a V_{oc} por uma constante N . Por exemplo, células de boa qualidade de silício cristalino, relacionam a tensão de máxima geração com V_{oc} por $N = 0,72$. Se uma célula não carregada for instalada no sistema onde está sendo produzida a energia, teremos a informação de tensão de circuito aberto, para as mesmas condições climáticas. A tensão de operação é ajustada então, para $N*V_{oc}$, a fim de produzir a máxima potência disponível.

O método de otimização da potência gerada nos painéis fotovoltaicos consiste em se fazer a leitura sucessiva da potência instantânea produzida pelo módulo, rastreando-se o ponto de máxima potência. Esse rastreamento pode ser feito de vários modos [2],[6], dentre eles tem-se:

- Variar a impedância da célula, a partir de uma tabela comparativa de variação da tensão em função da temperatura. Esse método teria que ser aplicado somente após análise das curvas dos módulos.

- Alterar a razão cíclica de um conversor na saída dos módulos, através do rastreamento do ponto de potência máxima através de algoritmo específico. Para o caso em questão, esse foi o método utilizado.

Pelo algoritmo "Hill Climbing Control", busca-se o ponto máximo da curva de potência. A partir dessa potência, define-se a corrente para este ponto de potência máxima a qual vai ser injetada no barramento, num modo análogo ao uso do gerador de indução nas gerações eólica ou hidráulica.

3.6 Dimensionamento do Banco de Baterias

O banco de baterias supre o sistema nos momentos de ausência de energia das fontes primárias. Ele deve fornecer potência somente à carga principal e para tal ser projetado. A carga secundária tem a função de drenar o excesso de potência das fontes primárias depois de carregado o banco de baterias ou a potência que não foi usada na carga, bem como ajustar a tensão nominal da carga principal.

Todos os tipos de acumuladores merecem atenção especial em relação às características nominais de carga e descarga, de modo a se prolongar sua vida útil.

O programa controlador desenvolvido para esta dissertação foi projetado para não permitir que a tensão de flutuação exceda o valor normal da bateria e ela mantenha-se carregada. Esse valor é aproximadamente 10% acima da tensão nominal, que é a média dos valores encontrados durante o processo de descarga [13].

O banco de baterias utilizado é do tipo chumbo-ácido, escolhido pela facilidade de manutenção e aquisição no mercado convencional para sistemas alternativos e também pelo baixo custo, em comparação com outros tipos de acumuladores.

Conforme indicação de diversos fabricantes [13,14], há que se ter cuidado com as correntes de carga e descarga, que nunca deverão exceder 1/10 do valor nominal da bateria, por exemplo, a bateria de 140 Ah não será carregada ou descarregada com corrente superior a 14 A, sob pena de ter-se reduzida enormemente sua vida útil. Durante a carga, a tensão de flutuação sobe gradativamente, ultrapassando a tensão nominal, mas nunca podendo atingir a tensão de gaseificação, onde pode ocorrer consumo de corrente por eletrólise da água. Numa bateria com tensão nominal igual a 12V, a tensão de gaseificação é de aproximadamente 15,15V.

Baterias de chumbo-ácido não devem ser descarregadas totalmente, e esse valor de descarga, conforme os fabricantes [13,14] é de 10% da capacidade nominal, no máximo. Já as baterias de níquel-cádmio devem trabalhar em ciclos de carga e descarga completos.

Para exemplificar um ciclo de funcionamento do banco de baterias com corrente controlada pode-se usar a figura 3.8. Como se pode observar, a carga não excede a tensão limite (ponto 2), quando o circuito está aberto e o banco descarrega-se até um ponto de estabilização, em torno de 12,7 V (ponto 3). Inicia-se um período de consumo

ou descarga, que vai até o limite mínimo (ponto 4), onde o circuito deve ser aberto até que as fontes primárias ofereçam novamente condição de carga.

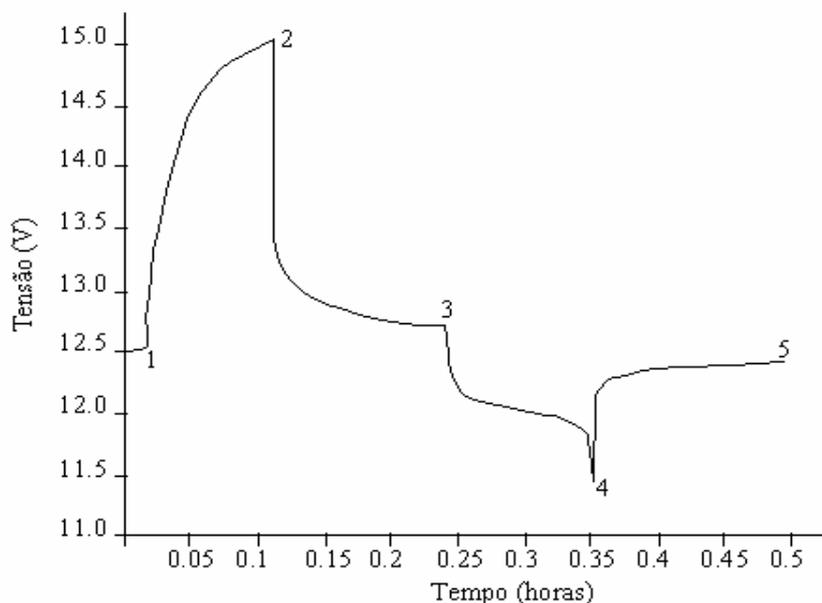


Figura 3.8: Ciclo de carga e descarga de uma bateria

Uma bateria por ser uma fonte de tensão, tem a ela associada uma resistência interna que faz com que a tensão em seus terminais caia à medida que a corrente fornecida aumenta. Tem o comportamento semelhante ao de um capacitor associado a uma resistência, que limita sua corrente de carga e descarga e, portanto, seu comportamento elétrico pode ser representado pela seguinte equação:

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.14)$$

onde V representa a tensão resultante, V_0 representa a tensão inicial da bateria, e é a base do logaritmo neperiano e vale 2,718281828, t é o tempo de carga ou descarga, que vai ser determinado pela capacitância C associada ao elemento, multiplicada por sua resistência interna R .

É óbvio que na descarga, com o objetivo de transformar energia elétrica numa outra forma de energia, tem-se na resistência interna, uma outra impedância associada limitando a sua corrente de descarga.

O algoritmo de controle do conjunto fonte-sistema-armazenador monitora fundamentalmente dois limites máximos, que são os pontos 2 e 4 da curva. O módulo deverá funcionar como uma fonte de corrente controlada e bilateral, para que seja eficiente e confiável no suprimento de energia através dos acumuladores.

No próximo capítulo, serão descritos os circuitos de controle das fontes alternativas de energia que foram utilizadas como base na elaboração do trabalho.

3.7 Resumo do Capítulo

Neste capítulo, fazemos uma breve explanação sobre as formas de se integrar fontes alternativas de energia elétrica entre si ou ao sistema de distribuição e justificamos a necessidade de considerar individualmente as diversas fontes de energia, onde como fonte de energia para as cargas, procurou-se converter as fontes primárias em fontes de corrente. A partir delas criou-se um barramento de corrente para as fontes e um barramento de tensão para as cargas. O HCC maximiza individualmente a corrente de cada fonte primária. O somatório de todas as correntes resulta numa fonte de corrente equivalente. A tensão na carga é ajustada pela modulação da resistência secundária.

Também caracterizamos os tipos de baterias mais usados em sistemas alternativos e os cuidados básicos na sua manutenção.