

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ GILSON SIQUEIRA

METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE UNIVERSALIZAÇÃO DAS
TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS

DM 10/2007

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ GILSON SIQUEIRA

**METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE UNIVERSALIZAÇÃO DAS
TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS**

**Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
UFPA, para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Elétrica na área de
Telecomunicações.**

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE UNIVERSALIZAÇÃO DAS
TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS**

AUTOR: JOSÉ GILSON SIQUEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA, APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 12/03/2007

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior - UFPA/PPGEE
(Orientador)**

**Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante – UFPA/PPGEE
(Membro)**

**Prof. Dr. Tadeu da Mata Medeiros Branco – UFPA
(Membro)**

**Prof. Dr. João Antonio Corrêa Pinto – CEFET/PA
(Membro)**

**Prof^ª. Dr. Valquiria Gusmão Macedo – UFPA
(Membro)**

VISTO:

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
Coordenador do PPGEE/CT/UFPA**

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e sabedoria nos momento de decisão.

Ao povo brasileiro que trabalhando e pagando impostos tornaram possível a realização desse mestrado.

Ao amigo e orientador Professor Petrônio Vieira Junior.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Pará, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas do Laboratório de Engenharia Elétrica e da Computação da UFPA, em especial ao Engenheiro Miguel Pacheco Nascimento, pelas importantes contribuições na montagem da parte prática deste trabalho.

Ao Coordenador do Programa de Pós-graduação, Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes, e a todos os colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), pelo apoio prestado.

Aos membros da banca examinadora.

Aos colegas de mestrado: Alex Ramos Costa, Pedro Ferreira e Pedro Ivan Palheta, pela amizade, companheirismo e dedicação.

A todos os amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado.

SUMÁRIO

Nomenclatura e Simbologia	xi
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxi
Resumo	xxii
Abstract	xxiii
Introdução Geral	1
CAPÍTULO 1 – FONTES DE ENERGIA PARA CENTRAIS DE TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS	
1.1 – Introdução.....	03
1.2 – Universalização das Telecomunicações	03
1.2.1 – Comunidades Atendidas	03
1.2.2 – Comunidades não Atendidas.....	04
1.3 – Composição de uma Estação Telefônica	05
1.4 – Fontes de Energia em Comunidades Isoladas	07
1.4.1 – Sistemas Elétricos Isolados.....	07
1.4.2 – Sistemas de Energia no Estado do Amazonas	08
1.4.3 – Sistemas de Energia no Interior do Estado do Amazonas	09
1.5 – Subsídios a Seleção de Fontes Primárias de Energia elétrica.....	10
1.5.1 – Energia Fotovoltaica	10
1.5.2 – Energia da Biomassa	11
1.5.3 – Pequenas Centrais Hidrelétricas.....	12
1.5.4 – Energia Eólica	13
1.5.5 – Energia Hidrocinética	14
1.5.6 – Energia Termelétrica.....	14
1.6 – Motivação e Seleção de Fontes de Energia	15
1.7 – Conclusão	16

CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIAS EMPREGADAS EM CONVERSORES PARA FONTES DE ENERGIA EM TELECOMUNICAÇÕES

2.1 – INTRODUÇÃO.....	17
2.2 – COMPARAÇÃO E SELEÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES NECESSÁRIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CONVERSORES DE ENERGIA.....	17
2.3 – MODULAÇÃO PWM - Pulse Width Modulation (Modulação Por Largura de Pulso) .	17
2.4 – CIRCUITOS INTEGRADOS EMPREGADOS EM CONVERSORES	20
2.4.1 – O dsPIC30F	20
2.4.2 – O Circuito Integrado CI 3524 – Gerador de PWM.....	21
2.4.3 – O Circuito Integrado TCA 785 – Disparo de Tiristor	22
2.4.4 – Circuito de <i>Driver</i>	23
2.5 – CIRCUITOS DE AJUDA A COMUTAÇÃO.....	23
2.6 – COMUTAÇÃO ZCS E ZVS	24
2.7 – MODELO MATEMÁTICO DA CÉLULA SOLAR	26
2.8 – CONCLUSÃO.....	29

CAPÍTULO 3 – ESTRUTURAS CONVERSoras DE ENERGIA

3.1 – INTRODUÇÃO.....	30
3.2 – CONVERSORES CC CC.....	30
3.2.1 – Conversor Abaixador de Tensão - Buck	30
3.2.2 – Conversor Elevador de Tensão - Boost.....	31
3.2.3 – Conversor Buck-Boost.....	33
3.2.4 – Conversor Cuk	33
3.2.5 – Comparação e Escolha entre Conversores CC CC	34
3.3 – RETIFICADORES TRIFÁSICOS TRADICIONAIS.....	34
3.3.1 – Ponte Semicontrolada Trifásica.....	35
3.3.2 – Ponte Totalmente Controlada Trifásica	36
(a) – Funcionamento com Carga Resistiva	37
(b) – Funcionamento com Carga Indutiva	38
3.4 – INVERSORES DE TENSÃO	39
3.4.1 – Inversor Monofásico em Ponte	39

3.4.2 – Inversor Trifásico	42
3.5 – CONCLUSÃO	43

CAPÍTULO 4 – BATERIAS E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

4.1 – INTRODUÇÃO	44
4.2 – CONCEITOS INICIAIS SOBRE BATERIAS	44
4.3 – TIPOS DE BATERIAS	45
4.3.1 – Níquel-Metal Híbrido	45
4.3.2 – Lítion-Íon	46
4.3.3 – Chumbo-Ácido	46
4.3.4 – Níquel-Cádmio	47
4.4 – MÉTODOS DE CARGA	47
4.5 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS BATERIAS	48
4.6 – DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	50
4.6.1 – Dimensionamento da Célula PV	51
4.6.2 – Dimensionamento do Banco de Baterias	53
4.7 – CONCLUSÃO	53

CAPÍTULO 5 – SISTEMAS DE ENERGIA PARA FONTES DE ALIMENTAÇÃO DE CENTRAIS DE TELECOMUNICAÇÕES

5.1 – INTRODUÇÃO	54
5.2 – HISTÓRICO DAS TELECOMUNICAÇÕES NO ESTADO DO AMAZONAS	54
5.3 – SISTEMAS DE ENERGIA PARA INSTALAÇÕES DE TELECOMUNICAÇÕES	56
5.4 – RETIFICADOR	57
5.5 – INVERSOR	58
5.6 – BATERIA	58
5.7 – PAINÉL FOTOVOLTAICO	59
5.8 – QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE ALTERNADA - QDCA	61
5.9 – QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA - QDCC	61
5.10 – REGULADOR	62
5.11 – UNIDADE DE SUPERVISÃO E CONTROLE	63

5.12 – FUNCIONAMENTO DE FONTES DE ENERGIA ININTERRUPTA COM GERAÇÃO SIMULTÂNEA PARA TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS	63
5.12.1 – Geração CA Local Presente e Painéis Solares Ativos	64
5.12.2 – Geração CA Local Ausente e Painéis Solares Ativos.....	65
5.12.3 – Geração CA Local Ausente e Painéis Solares Inativos.....	65
5.12.4 – Geração CA Local Presente e Painéis Solares Inativos	66
5.13 – SISTEMA DE GERAÇÃO SIMULTÂNEA PROPOSTO	66
5.14 – ESCOLHA DAS ESTRUTURAS.....	68
5.15 – CONCLUSÃO.....	70

CAPÍTULO 6 – PROJETO E SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES

6.1 – INTRODUÇÃO.....	71
6.2 – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS NOMINAIS DO PROJETO	71
6.3 – ROTEIROS DE PROJETOS E DIMENSIONAMENTO	73
6.3.1 – Dimensionamento da Célula PV	73
6.3.2 – Projeto do Estágio de Potência de um Pré-regulador <i>Boost</i>	74
(a) Dimensionamento do Filtro de Entrada - Indutor	75
(b) Dimensionamento do Filtro de Saída - Capacitor	76
6.3.3 – Projeto do Estágio de Potência do Pré-Regulador <i>Boost</i> 1 – Célula Fotovoltaica	
80	
(a) Dimensionamento do Filtro de Entrada - Indutor	81
(b) Dimensionamento do Filtro de Saída - Capacitor	82
(c) Dimensionamento do Dispositivo semicondutor	83
(d) Dimensionamento do Diodo <i>Boost</i>	83
6.3.4 – Dimensionamento do Banco de Baterias.....	83
6.3.5 – Projeto do Estágio de Potência do Pré-Regulador <i>Boost</i> 1 – Banco de Baterias	
80	
(a) Dimensionamento do Filtro de Entrada - Indutor.....	84
(b) Dimensionamento do Filtro de Saída - Capacitor	90
(c) Dimensionamento do dispositivo Semicondutor	90
(d) Dimensionamento do Diodo <i>Boost</i>	90

6.3.6 – Projeto do Conversor Bidirecional.....	91
6.4 - PRINCIPAIS FORMAS DE ONDA OBTIDAS NA SIMULAÇÃO.....	91
6.4.1 – Conversor Elevador <i>Boost</i> 1 - Célula PV	92
6.4.2 – Conversor Elevador <i>Boost</i> 2 – Banco de Baterias	94
6.4.3 – Conversor Bidirecional	95
(a) Atuação Como Retificador	95
(b) Atuação Como Inversor.....	96
6.5 - CONCLUSÃO	91
CAPÍTULO 7 – IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	
7.1 – INTRODUÇÃO.....	98
7.2 – ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS IMPLEMENTADOS.....	98
7.2.1 – Conversor Elevador <i>Boost</i> 1 – Célula PV	98
7.2.2 – Conversor Elevador <i>Boost</i> 2 – Banco de Baterias	100
7.2.3 – Conversor Bidirecional	101
7.3 – INTEGRAÇÃO DOS CONVERSORES	103
7.4 – ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES UTILIZADOS	105
7.4.1 – Conversores Elevadores <i>boost</i>	106
7.4.2 – Conversor Bidirecional	107
7.5 – PRINCIPAIS FORMAS DE ONDA OBTIDAS NA EXPERIMENTAÇÃO	108
7.5.1 – Conversor Elevador <i>Boost</i> 1 – Célula PV	108
7.5.2 – Conversor Elevador <i>Boost</i> 2 – Banco de Baterias	110
7.5.3 – Conversor Bidirecional	111
(a) Atuação Como Retificador.....	111
(b) Atuação Como Inversor	113
7.6 – CONCLUSÃO.....	115
Conclusões	112
Referências Bibliográficas	114

Nomenclatura e Simbologia

Símbolos Adotados no Equacionamento

Símbolo	Significado	Unidade
A_E	Área da secção transversal do núcleo de um Indutor	cm^2
AO	Área total a ser ocupada pelos painéis	m^2
AP	Área ocupada pelo painel escolhido	m^2
A_W	Área da janela do núcleo de um Indutor	cm^2
CAB	Capacidade de armazenamento ou reserva das baterias	kWh
CDE	Consumo Diário de energia	Wh
CE_{CD}	Consumo de energia DC	Wh
DA	Número de dias sem radiação solar	
DB	Amplitude de descarga das baterias	%
D_{MIN}	Razão cíclica mínima	
FS	Fator de segurança para perdas	
H_{CD}	Total de horas no dia em utilização de cargas CC	h
I_0	Corrente nominal de saída	A
I_D	Corrente de fotodiodo	A
I_L	Corrente de Carga	A
I_{LMED}	Corrente média de carga	A
I_{MAX_S}	Máxima corrente no dispositivo semiconductor	A
I_{Dmed}	Corrente média no diodo	A
I_{IN_MAX}	Máxima corrente na entrada	A
I_{PV}	Corrente do gerador	A
I_{RP}	Corrente da resistência shunt	A
I_{RS}	Corrente da resistência série	A
I_{SCR}	Corrente no tiristor	A
J_{MAX}	Máximo valor de densidade de corrente no condutor	A/cm^2
J_N	Junção de ordem n do tiristor	
K_W	Fator de ocupação de um núcleo de um indutor	

$L_{\text{entreferro}}$	Comprimento do entreferro	cm
L_T	Comprimento médio de uma espira de um Indutor	cm
N	Número de espiras	
NH	Número de horas de máxima radiação solar	h
NTP	Número total de painéis	
P_0	Potência de saída	W
P_{CD}	Potência de cargas CC	W
PE	Painel escolhido	
P_I	Potência de entrada	W
PR	Potência do grupo-gerador	W
R_P	Resistência shunt	Ω
R_S	Resistência série	Ω
S_N	Interruptor de ordem n	
T	Período de uma Forma de onda Periódica	S
t_τ	Tempo de largura do pulso no sinal PWM	S
T_N	Transistor de ordem n	
V_0	Tensão na saída do conversor	V
V_{AK}	Tensão entre o anodo e o catodo	V
V_E	Volume do núcleo de um Indutor	cm ³
V_L	Tensão de carga	V
V_{IN_MAX}	Tensão máxima na entrada do conversor	V
V_{IN_MIN}	Tensão mínima na entrada do conversor	V
V_{IN}	Tensão nominal na entrada do conversor	V
V_{RMAX_D}	Tensão reversa máxima no diodo	V
$V_{L(MAX)}$	Tensão de linha máxima	V
V_{REVM_TIR}	Tensão inversa máxima no tiristor	V
V_{RMAX_S}	Tensão reversa máxima no dispositivo semiconductor	V
V_o	Tensão média de carga	V
V_{PV}	Tensão do gerador fotovoltaico	V

ωt	Posição angular de uma forma de onda periódica	rad/s
θ	Ângulo geométrico	°
η_B	Rendimento da bateria	%
ΔV_0	Máxima ondulação da tensão na saída	V
ΔI_I	Máxima ondulação de corrente na entrada	A
ΔI_{I_B}	Máxima variação de corrente na entrada do conversor <i>boost</i>	A
α	Ângulo de disparo	°

Acrônimos e abreviaturas

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CAMTEL	Companhia Amazonense de Telecomunicações
CC	Corrente Contínua
CC CA	Corrente Contínua – Corrente Alternada
CEAM	Centrais Elétricas do Amazonas
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
D.D.P.	Diferença de Potencial
DG	Distribuidor Geral
ELETROACRE	Centrais Elétricas do Acre S.A.
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.
EMBRATEL	Empresa Brasileira de Telecomunicações S.A.
ERB	Estação Rádio Base
FCA	Fonte de Corrente Alternada
FCC	Fonte de Corrente Contínua
GETEL	Grupo Geral de Telecomunicações
GETEM	Grupo Executivo de Telecomunicações para o Amazonas
GMG	Grupo Motor Gerador
HF	High Frequency - Freqüência Alta
INPA	Instituto de Pesquisas da Amazônia
LABEP	Laboratório de Eletrônica de Potência
LGT	Lei Geral das Telecomunicações
ME	Manaus Energia S.A.
MOSFET	Transistor de efeito de campo - “Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”
MPP	Ponto de Máxima Potência - “Maximum Power Point”
N	Semicondutor do Tipo Negativo

P	Semicondutor do Tipo Positivo
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PGMU	Plano Geral de Metas de Universalização
PN	Junção Entre dois Materiais Semicondutores Tipo P e Tipo N
PV	Painel Fotovoltaico
PWM	Modulação Por Largura de Pulso - “Pulse Width Modulation”
QDCA	Quadro de Distribuição de Corrente Alternada
QDCC	Quadro de Distribuição de Corrente Contínua
Q _N	Pino de Ordem N do circuito Integrado
RACK	Bastidor de Equipamento de Telecomunicação
RC	Constante de Tempo do Capacitor
SIO ₂	Dióxido de Silício
SIVAM	Sistema de Vigilância da Amazônia
SMC	Serviço Móvel Celular
SOA	Safe Operating Área - Área Segura de Operação
STFC	Sistema de Telefonia fixa Comutada
SUDAM	Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia
TBP	Transistor Bipolar de Potência
TELAMAZON	Empresa de Telecomunicações do Estado do Amazonas S.A.
TR	Transmissão Via Rádio
TS	Transmissão Via Satélite
TUP	Telefone de Uso Público
UFPA	Universidade Federal do Pará
UHF	Ultra High Frequency - Frequência ultra Alta
UR	Unidade Retificadora
UTM	Unidade Térmica de Manaus
ZCS	Zero Current Switching - Comutação Por Corrente

	Nula
ZCT	Zero Current Transition - Transição Sob Corrente
	Nula
ZVS	Zero Voltage Switching - Comutação Por Tensão
	Nula
ZVT	Zero Voltage Transition - Transição sob Tensão Nula

Índice das Figuras

FIGURA	SIGNIFICADO
Figura 1.1	Estação de satélite no interior da Amazônia: resultado do PGMU.
Figura 1.2	Rios amazônicos e a dificuldade na penetração de linhas de distribuição de energia elétrica
Figura 1.3	Usina termelétrica da cidade de Itacoatiara no Estado do Amazonas
Figura 1.4	Painel solar em aplicação no interior da Região Amazônica
Figura 1.5	Os geradores a diesel requerem acomodação em sala própria
Figura 2.1	Componentes semicondutores de potência: limites seguros de operação
Figura 2.2	Conversor <i>buck</i> e forma de onda da tensão aplicada na saída
Figura 2.3	Modulação PWM de nível CC
Figura 2.4	Separador de dados e barramento do programa
Figura 2.5	Circuito integrado UC 3524 e seu diagrama de ligação
Figura 2.6	Diagrama de blocos do TCA 785
Figura 2.7	Oscilação e sobre tensão provocada por indutância e capacitância parasitas do circuito, durante o bloqueio de um dispositivo semicondutor controlado
Figura 2.8	Forma de onda da chave principal: ZVS-PWM
Figura 2.9	Característica de saída tensão x corrente de um painel fotovoltaico típico para dois valores de radiação solar com temperatura constante
Figura 2.10	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica
Figura 3.1	Conversor abaixador de tensão – <i>buck</i>
Figura 3.2	Conversor elevador de tensão – <i>boost</i>

Figura 3.3	Formas de onda para a chave do conversor <i>boost</i>
Figura 3.4	Principais formas de onda para o conversor <i>boost</i>
Figura 3.5	Conversor abaixador elevador de tensão – <i>Buck-Boost</i>
Figura 3.6	Conversor <i>cuk</i>
Figura 3.7	Ponte semicontrolada trifásica
Figura 3.8	Formas de onda para condução contínua na ponte trifásica mista
Figura 3.9	Ponte mista com diodo de circulação
Figura 3.10	Ponte de <i>GRAETZ</i> a tiristor
Figura 3.11	Tensão média na carga em função do ângulo de disparo α
Figura 3.12	Carga indutiva e operação como retificador ou inversor
Figura 3.13	Inversor monofásico em ponte com carga resistiva
Figura 3.14	Tensão e corrente de carga para o inversor monofásico onda completa com carga resistiva
Figura 3.15	Etapas de funcionamento do inversor para carga indutiva
Figura 3.16	Formas de onda para o inversor monofásico de onda completa com carga indutiva
Figura 3.17	Estrutura do inversor trifásico
Figura 3.18	Diagrama de comando do inversor trifásico
Figura 4.1	Durabilidade das baterias de Ni-Cd e Pb-Ácido em relação à temperatura
Figura 5.1	Diagrama de blocos de um sistema de energia ininterrupta para telecomunicações
Figura 5.2	Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica
Figura 5.3	Característica de saída tensão x corrente de um painel fotovoltaico típico para um valor de radiação solar, com temperatura constante

Figura 5.4	Atuação do regulador de tensão
Figura 5.5	Sistema de geração simultânea com painel fotovoltaico
Figura 5.6	Conexões no sistema de geração proposto em [26] Conexões no sistema de geração proposto neste trabalho
Figura 5.7	Diagrama em blocos da estrutura básica
Figura 6.1	Fluxo de potência entre os conversores
Figura 6.2	Função de transferência do conversor <i>boost</i>
Figura 6.3	Núcleo e carretel do tipo E
Figura 6.4	Distribuição do entreferro
Figura 6.5	Circuito do conversor elevador da célula fotovoltaica
Figura 6.6	Tensão de entrada e de saída do conversor elevador <i>boost</i> 1- fotovoltaico
Figura 6.7	Sinal de controle no <i>gate</i> do MOSFET de potência do conversor elevador <i>boost</i> 1- célula fotovoltaica
Figura 6.8	Carga e descarga do indutor do conversor <i>boost</i>
Figura 6.9	Circuito do conversor elevador das baterias
Figura 6.10	Tensão de entrada e saída do conversor elevador da bateria
Figura 6.11	Circuito simulado no software Pspice do conversor bidirecional
Figura 6.12	Tensão e corrente média na saída para atuação do conversor como retificador
Figura 6.13	Tensão e corrente média na saída para atuação do conversor como inversor
Figura 7.1	Esquemático do conversor <i>boost</i> 1 - célula fotovoltaica
Figura 7.2	Circuito de disparo do conversor <i>boost</i>
Figura 7.3	Esquemático do conversor <i>boost</i> 2 - banco de baterias

Figura 7.4	Diagrama do conversor bidirecional
Figura 7.5	Placa de comando responsável pelo <i>gatilhamento</i> de um par de tiristores
Figura 7.6	Placas de circuito impresso da montagem
Figura 7.7	Vista geral do conversor bidirecional
Figura 7.8	Vista geral do conjunto de resistências utilizadas durante os ensaios
Figura 7.9	Detalhe da ponte de tiristores tendo ao fundo o transformador de alimentação
Figura 7.10	Detalhe dos dois conversores <i>boost</i> implementados e seu controle baseado no PIC 16F877
Figura 7.11	Tensão de entrada e de saída do conversor elevador <i>boost</i> 1- fotovoltaico
Figura 7.12	Tensão de controle no MOSFET de potência
Figura 7.13	Carga e descarga do indutor do conversor <i>boost</i>
Figura 7.14	Tensão de entrada e saída para o conversor <i>boost</i> 2 - banco de baterias
Figura 7.15	Tensão e corrente de disparo para um ângulo de disparo próximo a 40°
Figura 7.16	Tensão e corrente de disparo para um ângulo de 40°
Figura 7.17	Tensão e corrente de disparo na saída do conversor para funcionamento como inversor
Figura 7.18	Sinais usados para o estabelecimento dos pulsos de disparo, para o ângulo de 90°

Índice de Tabelas

TABELA	SIGNIFICADO
Tabela 4.1	Características gerais de cargas em baterias
Tabela 6.1	Características gerais de carga da estação telefônica
Tabela 6.2	Especificações do conversor <i>Boost</i>
Tabela 6.3	Especificações do conversor <i>boost 2</i>
Tabela 7.1	Programação de <i>jumpers</i> para passagem monofásico/trifásico
Tabela 7.2	Relação de componentes do conversor <i>boost 1</i>
Tabela 7.3	Relação de componentes da placa de controle digital
Tabela 7.4	Relação de componentes do conversor <i>boost 2</i>
Tabela 7.5	Relação de componentes do conversor bidirecional

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo da transformação da energia solar em energia elétrica através da conversão fotovoltaica aplicada à alimentação de sistemas de telecomunicações em comunidades isoladas. Para tanto, são mostradas as diversas tecnologias utilizadas, os princípios de conversão e armazenagem de energia, além dos tipos de sistemas que podem ser implantados e suas restrições. O objetivo deste arranjo é oferecer uma contribuição ao sistema de alimentação para telecomunicações em comunidades isoladas na Região Amazônica. O trabalho proposto procura viabilizar a combinação dos diversos conversores de energia para produzir uma fonte de alimentação para telecomunicações em comunidades isoladas, alimentada a partir de um gerador fotovoltaico combinado com uma geração CA local, com menor grau de complexidade e menor custo possível, uma vez que deve se atingir com esta técnica excelentes níveis de desempenho.

ABSTRACT

This work presents the study of the transformation of the solar energy in electric power through the conversion applied photovoltaic the feeding of systems of telecommunications in isolated communities. For so much, the several used technologies, the conversion beginnings and storage of energy are shown, besides the types of systems that can be implanted and their restrictions. The objective of this arrangement is to offer a contribution to the feeding system for telecommunications in isolated communities in the Amazonian area. The work proposed search to make possible the combination of the several converters of energy to produce a feeding source for telecommunications in isolated communities, fed starting from a photovoltaic generator combined with a AC local generation, with smaller complexity degree and smaller possible cost, once it owes if it reaches with this technique excellent acting levels

INTRODUÇÃO GERAL

A geração simultânea de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, ou seja, a geração de energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos paralelamente a outro tipo de geração local, é uma solução que possibilita a alimentação de centrais de telecomunicações para atender pequenas comunidades isoladas de forma eficiente e sem os custos normalmente associados à grandes linhas de distribuição.

Centros de pesquisa no mundo inteiro desenvolvem pesquisas na área de fontes de alimentação para centrais de telecomunicações em parceria com empresas que atuam no setor. No entanto, pouco esforço é demandado na elaboração de projetos voltados para pequenas localidades distantes e isoladas.

A presente dissertação tem como objetivo o estudo e implementação de uma fonte de energia destinada a alimentar uma pequena central telefônica em comunidade isolada, com suas características voltadas para a realidade encontrada no interior da Região amazônica. A metodologia consiste no estudo e comparação dos diversos conversores clássicos utilizados na construção desses equipamentos, concluindo com a melhor escolha para a aplicação.

Uma estrutura utilizada é o conversor *boost*, que faz a interface entre o sistema fotovoltaico e o conversor bidirecional, utilizando para isso um micro controlador acoplado a um circuito que realiza o disparo dos MOSFET de potência, através da modulação por largura de pulso.

Como principais características dessa topologia, citam-se: alta eficiência com a redução do peso e volume da estrutura e modularidade. Aliada a estas características tem-se a utilização de circuitos integrados dedicados, consagrados e bem adaptados nos segmentos científicos e industriais, responsáveis pelos circuitos de comando e controle das topologias.

A presente dissertação está estruturada em 7 capítulos.

No capítulo 1, é apresentada uma introdução ao setor de telefonia em comunidades isoladas, salientando as suas principais características e dificuldades. Faz-se uma breve descrição de algumas fontes de energia presentes nessas localidades, além da composição de uma estação telefônica típica.

No capítulo 2, serão apresentadas algumas tecnologias empregadas nos modernos conversores de energia atualmente utilizados, visando fornecer subsídios para o estudo da fonte de energia proposta.

No capítulo 3, serão abordados alguns dos principais conversores de energia mais utilizados na atualidade, bem como considerações matemáticas sobre o seu funcionamento e dimensionamento.

No capítulo 4 é feita uma revisão bibliográfica das células PV e das baterias mais empregadas na atualidade, enfatizando os principais aspectos do seu funcionamento e emprego.

No capítulo 5, é descrito um sistema de energia para fontes de alimentação em comunidades isoladas, relacionando todos os equipamentos integrantes e suas finalidades, bem como todas as combinações possíveis de funcionamento de um sistema de geração simultânea de energia com um conjunto bateria e painéis solares. Também é feita a escolha dos conversores selecionados

No capítulo 6, é feito todo o roteiro de projeto e dimensionamento dos conversores de energia escolhidos, bem como apresentado os resultados de simulação obtidos a partir do programa Pspice.

Por fim, no capítulo 7, são apresentados os resultados experimentais resultantes das montagens feitas no Laboratório de Eletrônica de Potência da UFPA, com as conclusões do trabalho de interligação dos estágios e a avaliação do sistema. A partir de então é feita uma explanação sobre a perspectiva para trabalhos posteriores.

1 FONTES DE ENERGIA PARA CENTRAIS DE TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS

1.1. Introdução

Uma das grandes dificuldades para universalização das telecomunicações na Região Amazônica é a falta de energia elétrica, haja vista que as comunidades normalmente, estão distantes das redes públicas de distribuição de energia elétrica. Em muitos casos, é necessária a geração de energia elétrica, no próprio local, visando levar a comunicação para estas populações de forma a integrá-las efetivamente ao país.

Entende-se por comunidades isoladas, do ponto de vista da energia elétrica, aquelas que não estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional - SIN. Para essas situações, uma forma de geração de energia elétrica deve ser buscada, para implantação de estações telefônicas. Não há uma única fonte de energia que atenda, de forma eficaz, todas as situações. Em vez disso, para cada localidade pode existir uma forma de energia diferente, que atenda melhor, ao propósito de alimentar os equipamentos de telecomunicações.

Neste capítulo é feita uma descrição das principais fontes de energia alternativas disponíveis nas localidades isoladas, suas características e sua empregabilidade. Descreve-se o papel da universalização das telecomunicações e a composição de uma estação telefônica típica de uma comunidade amazônica.

1.2. Universalização das Telecomunicações

A Lei Geral das Telecomunicações - LGT, aprovada em julho de 1997, traça o novo modelo para as telecomunicações no Brasil. A base é a universalização dos serviços e a livre competição entre as empresas de telefonia. Para isso foi estabelecido que, as empresas que atendessem determinadas metas de implantação de telefones, antes do prazo previsto, seriam premiadas com o acesso aos mercados de suas concorrentes.

1.2.1. Comunidades Atendidas

De acordo com [1], localidades atendidas são aquelas com acesso aos serviços de telecomunicações por parte de alguma operadora. Por se tratar de uma região pouco povoada e com pouca atividade econômica, se resumem a poucos lugares.

O Plano Geral de Metas de Universalização – PGMU, parte integrante da Lei Geral de Telecomunicações - LGT, obrigou as empresas de telecomunicações a instalarem equipamentos em regiões remotas, com pequenas populações, e sem os recursos de manutenção e operação normalmente presentes em centros maiores.

Daí resultou a necessidade de projetar uma fonte de energia robusta, de baixo custo, de pequena capacidade e que necessitasse de pouca manutenção, destinada a ser empregada nessas situações.

1.2.2. Comunidades não Atendidas

A Telemar, concessionária que opera a rede de telefonia fixa em grande parte da região Amazônica, decidiu antecipar as metas estabelecidas no Plano Geral de Metas de Universalização – PGMU, do sistema de telefonia para 2001, cujo prazo se estendia até 2003 e entre suas premissas estabelecia que:

- Localidades com 300 habitantes (cerca de 60 casas próximas, considerando 5 pessoas por domicílio) e que distam até 30 km da sede municipal, devem ser atendidas com pelo menos 1 telefone de uso público – TUP;
- Localidades com mais de 600 habitantes seriam atendidas por meio de acessos individuais;
- Localidades e populações em regiões remotas de fronteira, também teriam que ser atendidas, com acesso as telecomunicações.

Conforme o levantamento das necessidades indicou [2], em 31 localidades determinadas para novas estações telefônicas, não havia disponibilidade de energia elétrica para o suprimento de potência aos equipamentos da estação telefônica. Em outro pequeno número de localidades havia disponibilidade de energia elétrica, porém com a rede de distribuição distante do local de construção da estação telefônica, sendo necessária a construção de rede elétrica em alta tensão de 13,8 kV e com extensão de até 20 km, em algumas localidades.

Diante do problema e do escasso tempo para um estudo aprofundado sobre qual a melhor alternativa energética que garantisse o suprimento de energia elétrica às estações desprovidas do fornecimento desse serviço, a Telemar decidiu instalar sistemas de energia solar, composto por módulos fotovoltaicos interligados convenientemente entre si e com outros equipamentos auxiliares, para garantir o suprimento energético àquelas estações, conforme ilustrado na figura 1.1.



Figura 1.6. Estação de satélite no interior da Amazônia: resultado do PGMU.

Com a necessidade de consolidação do Projeto de Implantação do Sistema de Telefonia Fixa Comutada – STFC, em localidades com 600 ou mais habitantes no interior do Estado do Amazonas, foi constatado o problema da falta de energia elétrica comercial, em várias localidades do interior do estado do Amazonas [3]. Diante dessa situação, a questão crucial do suprimento energético nessas localidades se sobressaiu. Como instalar equipamentos de telecomunicações onde não existe energia elétrica confiável? Uma fonte alternativa de energia elétrica teria que ser disponibilizada localmente, para tornar possível a instalação desses equipamentos.

1.3. Composição de uma Estação Telefônica

Uma estação telefônica típica é composta por equipamentos eletrônicos principais e auxiliares, além de instalações elétricas prediais, conforme descrição a seguir:

- **CENTRAL DE COMUTAÇÃO:** Equipamento fundamental em uma estação telefônica, composta por gabinetes metálicos que abrigam placas e dispositivos eletrônicos que permitem a comunicação telefônica (comutação dos sinais) e, também, a comunicação de dados, internet, etc;
- **TRANSMISSOR E RECEPTOR:** No sistema de transmissão/recepção podem ocorrer duas situações: na primeira a transmissão/recepção dos sinais é feita por rádio digital e tem-se o equipamento principal (rádio) alojado em um *rack* próprio que se interliga com uma antena instalada em uma torre metálica no terreno da estação. Na outra situação a transmissão-recepção é feita via satélite, tendo-se equipamentos e placas eletrônicas alojados em gabinetes instalados dentro do prédio da estação e, ainda, equipamentos instalados externamente junto da antena parabólica que permitem a transmissão e recepção eletromagnética dos sinais de voz ou dados;
- **SISTEMAS AUXILIARES:** Equipamentos como o inversor que converte tensão contínua em tensão alternada, blocos telefônicos instalados em ferragens próprias formando o distribuidor geral – DG e fios telefônicos metálicos ou fibra óptica;
- **SISTEMA DE ENERGIA:** É especificado levando-se em consideração os critérios que determinam a quantidade, autonomia e tipo de equipamento a ser empregado. Considerando-se que a confiabilidade do sistema, isto é, a condição de funcionamento ininterrupto de energia, é de vital importância para o desempenho dos equipamentos por ela alimentados, alguns dados de máxima importância, como a quantidade de usuários, devem ser considerados para a especificação dos equipamentos que compõem o sistema de energia;
- **INSTALAÇÕES PREDIAIS:** São elementos tais como iluminação interna e externa, condicionamento de ar, ventilação ou exaustão forçada e tomadas de uso geral que permitem o conforto dos técnicos e a operacionalidade dos equipamentos de telefonia e de energia da estação.

Um sistema de energia para suprimento de estações telefônicas é de um modo geral, composto por duas fontes distintas, a saber:

- FONTE DE CORRENTE ALTERNADA – FCA: É constituída basicamente dos mesmos equipamentos tais como inversor, GMG, etc. havendo diferença apenas nas capacidades.
- FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA – FCC: Pode ser constituída por tipos de equipamentos bastante diversificados, como por exemplo, retificadores, baterias, ETC.

O que determina o dimensionamento e, conseqüentemente, a especificação completa de um sistema de energia para telefonia são os equipamentos que a compõem (consumo) e a função da mesma no sistema telefônico.

Essas fontes são constituídas por equipamentos principais com tensão e potência específicos, além de outras unidades e sistemas auxiliares, tendo por finalidade o suprimento de potência elétrica direta ou indiretamente para os diversos equipamentos que compõem uma estação de telecomunicação, independente de sua função, porte ou tipo.

Na fonte de energia para telecomunicações a ser desenvolvida supõe-se em princípio que a fonte de corrente alternada comercial não existe e o suprimento energético das estações tem que ser por auto produção. Diante dessa situação estudam-se as alternativas de fontes de energia disponíveis para o suprimento de energia em sistemas de telecomunicações remotos ou desprovidos de energia elétrica comercial:

1.4. Fontes de Energia em Comunidades Isoladas

As comunidades isoladas são aquelas não atendidas pela rede elétrica pública, enquanto que as comunidades rurais são aquelas afastadas da zona urbana e que, muitas delas, permanecem isoladas por não serem atendidas pela rede de distribuição de energia elétrica.

1.4.1. Sistemas Elétricos Isolados

As formas como as comunidades isoladas da região se distribuem, dispersas e ao longo das calhas dos rios, conforme ilustra figura 1.2, faz com que a extensão de linhas de distribuição de energia, a partir das centrais localizadas nas sedes dos municípios, seja descartada na grande maioria dos casos em função, principalmente, dos altos custos que representam as extensões dessas linhas e das dificuldades de transposição dos acidentes geográficos que se interpõem (grandes áreas de floresta, lagos, rios, etc.).

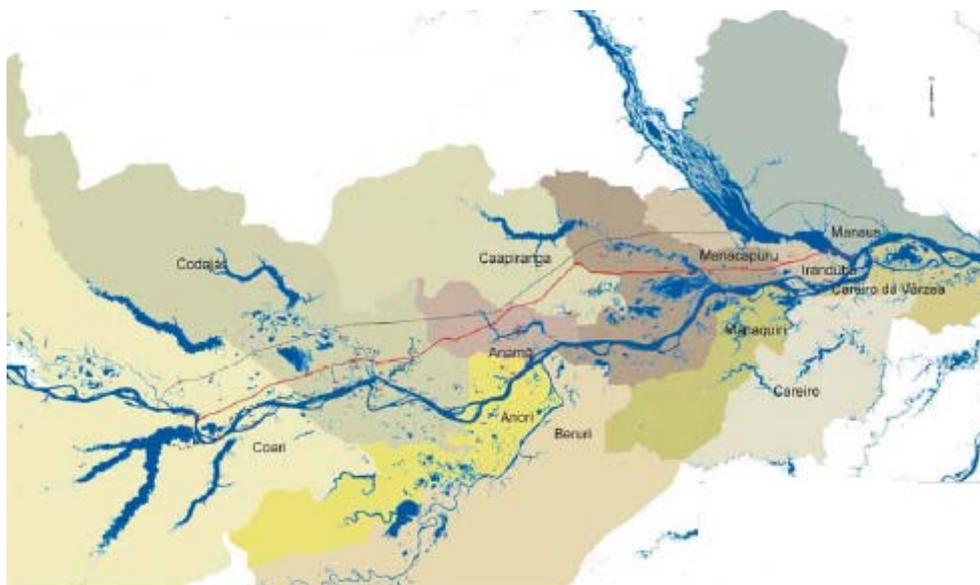


Figura 1.7. Rios amazônicos e a dificuldade na penetração de linhas de distribuição de energia elétrica [4].

Diferentemente do sistema elétrico interligado, que é predominante no País, o sistema elétrico isolado de geração e transmissão predomina na Região Norte. São aproximadamente 300 localidades eletricamente isoladas umas das outras, destacando-se as principais capitais estaduais: Boa Vista, Macapá, Manaus, Porto Velho e Rio Branco.

Os altos custos da geração a óleo diesel motivados, principalmente, pelo custo do combustível, pelas dificuldades de abastecimento e manutenção dos sistemas de geração e distribuição, aliados à baixa renda dos moradores locais, inviabilizam as comunidades isoladas como nichos de mercado para este tipo de geração.

Assim por exemplo, das cerca de 4.600 comunidades contabilizadas no Estado do Amazonas, somente 32 (aproximadamente 0,7%) são supridas com energia elétrica por meio da concessionária responsável pela eletrificação dos municípios do interior e áreas rurais – Centrais Energéticas do Amazonas - CEAM [5]. A CEAM atende, também, algumas localidades localizadas em outros estados amazônicos, mas situadas nos limites do Estado do Amazonas.

1.4.2. Sistemas de Energia no Estado do Amazonas

A distribuição e a comercialização da energia elétrica no Estado do Amazonas são realizadas por duas empresas: Manaus Energia S.A. - ME e Companhia Energética do Amazonas - CEAM, ambas sob o controle acionário das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A. - ELETRONORTE. Parte da geração de energia elétrica produzida em Manaus é realizada por produtores independentes, como a empresa americana *El Passo*, que repassa a energia elétrica gerada diretamente para a concessionária local.

A ME atende a cidade de Manaus, os municípios de Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva, Agrovila de Puraquequara e, mais recentemente, os municípios de Iranduba, Manacapuru e Novo Airão que são municípios próximos a Manaus.

A matriz energética do Estado do Amazonas é, na sua quase totalidade, formada por usinas termelétricas. O sistema elétrico de Manaus é a exceção, caracterizando-se por ser do tipo hidrotérmico, com uma capacidade instalada de 1010,7 MW. De acordo com [6], dessa potência instalada, 250 MW, cerca de 20 % do total da geração, é suprido pela hidrelétrica de Balbina que opera em 230 kV e fica a 180 km de Manaus, localizada no município de Presidente Figueiredo.

Os 760,7 MW restantes, 75% da potência total instalada, são fornecidos por usinas termelétricas localizadas em Manaus. A demanda máxima registrada em Manaus, em agosto de 2004, foi 642 MW. Com a hidrelétrica de Balbina operando plenamente, a mesma fica responsável pelo fornecimento de quase 39% da demanda máxima.

Os maiores consumidores da Manaus Energia são das classes comercial, industrial e residencial, representando 99% do total, ou seja, 635,58 MW do consumo. O percentual restante de 1%, apenas 6,42 MW, representa os consumidores da área rural, poder público, iluminação pública e serviços públicos, além do consumo próprio.

Das usinas termelétricas instaladas na capital do Estado do Amazonas, três pertencem à Manaus Energia (UTM-1, UTM-2 e Eletron) e quatro são de produtores independentes, como a empresa americana El Paso.

1.4.3. O Parque Energético no Interior do Estado do Amazonas

O parque energético do interior do Estado do Amazonas está sob a responsabilidade de suprimento da CEAM. É totalmente composto por usinas termelétricas que utilizam o óleo diesel como combustível.

O município de Itacoatiara, o maior do interior do Amazonas e distante 240 km de Manaus, tem 90% de sua energia fornecida pelo produtor independente (produtor privado de energia elétrica que vende no mercado atacadista para a concessionária local) Mil Madeireira, que utiliza o princípio da co-geração, operando com resíduos de madeira para abastecer uma termelétrica de 9 MW, inaugurada em 30 de setembro de 2002, conforme ilustra a figura 1.3.



Figura 1.8. Usina termelétrica da cidade de Itacoatiara no Estado do Amazonas [7].

Em relatório da administração do ano de 2001, publicado em março de 2002 e disponível no site da empresa, consta que a CEAM opera e mantém o maior sistema térmico isolado do mundo, abrangendo uma área de 1,57 milhões de quilômetros quadrados. Pelo que é apresentado, a CEAM tem que se ocupar de todo o estado do Amazonas, além de outras unidades fora do estado. O estado do Amazonas possui uma área de 1,5 milhões de quilômetros quadrados.

Em termos do seu parque, ainda conforme o relatório, a CEAM possui 88 usinas termelétricas funcionando, totalizando uma potência nominal de 220,9 MW e 92 localidades atendidas em toda sua área de abrangência, no interior do estado do Amazonas, sendo que dessas, três que estão mais próximas da capital, são supridas pela ME, uma pela

ELETROACRE (município de Guajará) e uma (Itacoatiara) que conta, parcialmente, com um produtor independente.

1.5. Subsídios a Seleção de Fontes Primárias de Energia Elétrica

Segundo o estado da arte das fontes alternativas de energia, tanto no que diz respeito à maturidade tecnológica (tecnologia dominada, disponibilidade de peças de reposição, redes de assistência técnica, etc.) quanto à escala de produção de energia, uma gama variada de fontes de energia poderia ser estudada como potenciais para alimentar esses sistemas isolados.

As principais fontes primárias de energia disponíveis na Amazônia, com maiores chances de aproveitamento, são a fotovoltaica, a hidrocínética e a biomassa (lenha, resíduos florestais e óleos vegetais) em toda a região, e a eólica (em partes dos litorais do Pará e Amapá). No futuro existe a possibilidade da geração de energia elétrica, a partir do gás natural, ao longo do trajeto do gasoduto que está sendo construído entre as cidades de Coari e Manaus. Neste tópico discuti-se as várias possibilidades de energias alternativas disponíveis na região.

1.5.1. Energia Fotovoltaica

Diariamente incide sobre a superfície da terra mais energia vinda do Sol do que a demanda total dos habitantes do planeta em todo um ano. A utilização da energia solar para a geração da energia elétrica pode ocorrer indiretamente e diretamente.

A energia solar média recebida pela Terra é, aproximadamente, de $0,36 \text{ kW/m}^2$ [8], mas não é uniformemente distribuída pelas diferentes regiões, devido à inclinação da Terra. A principal vantagem no aproveitamento de energia solar está na conversão direta para a energia elétrica na forma de CC, que é a mais empregada na alimentação de equipamentos de telecomunicações.

A desvantagem maior está na eficiência de conversão de energia e ainda, os dispositivos que convertem a energia solar em elétrica (acumuladores solares) produzem pouca energia comparada com a consumida normalmente pela maioria dos equipamentos. Outra desvantagem se constitui nos baixos valores de tensão e correntes obtidos, na prática, por este processo.

Os módulos fotovoltaicos são muitas vezes utilizados pelas empresas de telecomunicações no Brasil para suprimento de estações telefônicas ou de rádios em localidades remotas e não supridas com energia elétrica comercial pública. Outras aplicações da energia fotovoltaica são para alimentação de comunidades rurais isoladas ou para alimentação de sistemas de bombeamento de água.

A figura 1.4 ilustra uma instalação típica, no interior do Estado do Amazonas, que usa a energia fotovoltaica, para alimentação de estação de telecomunicações. O número de módulos é dimensionado a partir da quantidade de equipamentos instalados e do nível de autonomia que se deseja, para prevenir períodos de tempo sem insolação adequada para geração de tensão nos painéis fotovoltaicos.



Figura 1.9. Painel solar em aplicação no interior da Região Amazônica.

1.5.2. Energia da Biomassa

É divulgada pelos pesquisadores como a mais promissora fonte de energia, especialmente no interior da Amazônia, onde existe uma grande disponibilidade de resíduos agrícolas ou florestais, além de óleos vegetais de diversas origens. A utilização dessas fontes de energia pode se viabilizar, onde elas forem mais atrativas e competitivas em comparação com a geração a óleo diesel, eventualmente de uma forma complementar a esta, em sistemas híbridos, como os que já existem em algumas localidades do interior da Amazônia a um custo muito baixo.

Conforme definição apresentada pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO, a biomassa do ponto de vista energético, é toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia [9]. Pode-se citar algumas delas:

- A madeira;
- O álcool;
- Óleos vegetais;
- Resíduos agrícolas;
- Esterco animal;
- Resíduos domésticos e urbanos.

Para a alimentação de pequenas centrais telefônicas na Região Amazônica, existe a possibilidade do emprego da geração de energia elétrica, a partir do aproveitamento de culturas agrícolas locais tais como cana de açúcar, milho ou madeira disponível, proveniente de localidades próximas.

De longe a fonte renovável alternativa mais promissora para a Região Norte, no campo da geração de energia elétrica, é a biomassa, seja na forma de resíduos de madeiras por exemplo, para queima em unidades de co-geração (geração simultânea de eletricidade e vapor de pressão), ou plantações com finalidades energéticas como por exemplo, óleos vegetais para queima em motores diesel.

1.5.3. Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH

A Pequena central hidrelétrica é por definição aquela com potências até 30 MW [10], tendo uma barragem bem menor que as grandes hidrelétricas. Constitui-se numa alternativa bastante interessante naqueles locais onde haja cursos de águas com características que permitam a transformação de sua energia potencial em elétrica.

Poucos lugares reúnem as condições necessárias à instalação das pequenas turbinas necessárias a alimentação dos equipamentos de telecomunicações. Entretanto, uma vez instaladas tem-se energia limpa, a baixo custo, para um horizonte de tempo limitado à vida útil dos equipamentos e instalações.

No Brasil existem, atualmente, centenas de Pequenas Centrais Hidrelétricas em operação, particularmente na região sudeste, representando uma importante contribuição adicional ao sistema elétrico nacional. A maior parte das PCHs distribui-se pelas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, sendo o Estado de Minas Gerais o que tem a maior concentração.

Em 1998, no município amazonense de São Gabriel da Cachoeira, localizado a 900 km de Manaus, foi iniciada a construção, sob a responsabilidade do Sistema de Vigilância da Amazônia - SIVAM, de uma PCH composta de quatro unidades geradoras de 1,2 MW, totalizando 4,8 MW de potência nominal. A usina estava prevista para iniciar a operação em 2000, mas não chegou a ser concluída, estando a obra paralisada.

A PCH foi projetada para ser implantada no igarapé Miuá com um preço estimado de R\$ 24 milhões. A energia gerada supriria potência para um dos radares do SIVAM e a energia excedente alimentaria a sede municipal, que contava com cerca de 20.000 habitantes, além de atender as comunidades indígenas de Tancredo Neves, Camanaus e Mercês.

1.5.4. Energia Eólica

Na Região Norte este tipo de energia se aplicaria aos litorais do Pará e do Amapá onde a intensidade dos ventos atinge o nível necessário para o acionamento das hélices. Da mesma forma que às PCH, é um tipo de energia limpa e renovável, apresentando uma desvantagem considerável, devido ao alto custo financeiro da sua implantação.

Apesar de ser uma fonte relativamente barata, a energia eólica apresenta algumas características que dificultam seu uso como fonte regular de energia. A ocorrência dos ventos, responsável pelo acionamento das hélices, pode se apresentar de forma irregular para períodos prolongados de tempo, fazendo variar a quantidade de energia diária disponível, muitas vezes em uma mesma estação do ano, de um mesmo local.

A energia eólica é hoje considerada uma das mais promissoras fontes naturais, principalmente porque é renovável, ou seja, não se esgota. Além disso, as turbinas eólicas podem ser utilizadas em conexão com redes elétricas, em sistemas de geração simultânea de energia elétrica ou em lugares isolados das redes de distribuição operando como fontes de fornecimento para pequenas cargas isoladas.

1.5.5. Energia Hidrocinética

Este tipo de energia consiste na instalação de um tipo especial de turbina que aproveita a correnteza dos rios, a água passa por seu interior e faz girar um eixo acoplado a um gerador. Têm uma grande desvantagem que é a baixa eficiência, sendo alvos de várias pesquisas, com o intuito de melhorar o seu desempenho.

Uma das grandes dificuldades das instalações dos geradores hidrocinéticos, submersos na correnteza dos rios, é a dificuldade causada pelo acúmulo de detritos que vem junto com a correnteza e que engata nas hélices.

Possui poucas possibilidades de ser empregada, no médio prazo, devido a sua baixa eficiência. O Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, sediado em Manaus, possui linhas de pesquisas em parcerias com empresas de energia elétrica que monitoram alguns experimentos de energia hidrocinética, no rio Uatumã, nas proximidades de Manaus.

1.5.6. Energia Termelétrica

Naquelas situações aonde não é possível o emprego de nenhuma fonte de energia gerada localmente, deve ser feito o uso da energia proveniente do óleo diesel, que também pode ser combinada com as outras fontes de energia. Apesar do seu custo, muito alto, na realidade tem sido a forma de energia mais empregada, nas situações onde não existe outra opção.

A instalação de um grupo motor gerador, conforme ilustra a figura 1.5, requer uma sala independente dos equipamentos da central telefônica, em virtude da sua intensa vibração.



Figura 1.10. Os geradores a diesel requerem acomodação em sala própria.

Os custos de instalação de equipamentos de geração de energia com óleo diesel situam-se em torno de US\$ 300,00 por kW instalado de energia gerada [11], representando custos de instalação inferiores a todas as fontes alternativas. Ultimamente têm-se falado muito na utilização do bio diesel na substituição do óleo diesel proveniente do petróleo. Esta é mais uma possibilidade que se abre para a região, com o intuito de prover energia para alimentar os equipamentos de telecomunicações.

Essa forma de gerar energia elétrica utilizando o óleo diesel, para o funcionamento de um motor a diesel e este acionando um alternador síncrono trifásico, constitui-se como sendo um sistema Grupo Motor Gerador - GMG, para geração de energia elétrica. Dependendo do porte da usina pode existir mais de um conjunto GMG.

A geração de energia elétrica, utilizando o óleo diesel combustível, tem sido largamente utilizada, pelo seu baixo custo e funcionalidade, principalmente nos sistemas isolados, em sua maioria no Norte do país. Uma grande desvantagem dessa forma de gerar energia elétrica é o alto custo associado ao transporte do combustível, para localidades distantes no interior da Região Amazônica.

Uma central termelétrica a diesel pode ser utilizada como fonte principal para alimentação de estações telefônicas de pequeno porte, implantadas em localidades desprovidas de energia elétrica comercial pública. Neste contexto, além de altos custos associados ao

transporte do combustível, esse tipo de geração apresenta grandes despesas com a manutenção do motor a diesel.

Em decorrência das limitações operacionais do motor diesel, são necessários normalmente, dois grupos-geradores por estação, com funcionamento e revezamento mensal automático e paralisação a cada dois meses para substituição de óleo lubrificante, filtros e manutenção preventiva em geral.

1.6. Motivação e Seleção de Fontes de Energia

Conforme foi abordado, em muitas localidades, não há disponibilidade de energia elétrica pela rede pública de distribuição de energia elétrica, para o suprimento de potência aos equipamentos da estação telefônica, no estado do Amazonas, por ocasião da implantação do PGMU, pela empresa Telemar Norte Leste S.A. - TELEMAR.

Em outro pequeno número de localidades há disponibilidade de energia elétrica, porém com a rede de distribuição distante do local de construção da estação telefônica, sendo necessária a construção de rede elétrica em alta tensão de 13,8 kV com extensão de até 20 km.

Propor uma fonte de energia para alimentar pequenas estações de telecomunicações no interior da Região Amazônica tornou-se, então, uma necessidade. Fazer uma abordagem teórica da eletrônica de potência e propor uma fonte com características voltadas para essa aplicação é o propósito deste trabalho.

A fonte de energia será composta por uma geração fotovoltaica, como geração CC e uma fonte de energia CA local escolhida de forma a minimizar os custos de geração de acordo com a realidade presente na região.

1.7. Conclusão

A implantação de estações de telecomunicações no interior da Amazônia, onde não se dispõe de energia elétrica, e a dificuldade de levar linhas de transmissão de energia para estas localidades é um desafio muito grande para instalações de equipamentos de telecomunicações. Na maior parte das situações, uma fonte de energia elétrica local terá que ser providenciada, para o funcionamento dos equipamentos.

Para a escolha de uma fonte de geração de energia em comunidades isoladas é desejável a compreensão e análise das alternativas presentes para se fazer a escolha mais eficiente, para alimentação dos equipamentos de telecomunicações.

A composição de uma estação típica do interior da região Amazônica é basicamente formada por: central de comutação, transmissor/receptor, sistemas auxiliares e sistemas de energia.

2 TECNOLOGIAS EMPREGADAS EM CONVERSORES PARA FONTES DE ENERGIA EM TELECOMUNICAÇÕES

2.1. Introdução

Neste capítulo será feita a escolha do dispositivo semicondutor empregado na construção dos conversores para telecomunicações propostos. Os principais circuitos integrados e suas aplicações, e que podem permitir todo o controle da fonte, são apresentados com suas principais características.

Um item é dedicado ao estudo de alguns dos circuitos de comutação suave, que visam a diminuir as perdas de chaveamento no funcionamento dos diversos equipamentos e ao estudo da ressonância das estruturas responsáveis pelo chaveamento dos conversores.

2.2. Comparação e Seleção de Dispositivos Semicondutores Necessários para Implementação de Conversores de Energia

A passagem de corrente elétrica em um meio depende da aplicação de um campo elétrico e da existência de portadores livres (usualmente elétrons). O chamado semicondutor, como o silício, tem uma condutividade intermediária entre os condutores e isolantes.

A figura 2.1 ilustra uma distribuição dos componentes semicondutores, indicando limites para valores de tensão de bloqueio, corrente de condução e frequência de comutação, para os dispositivos mais empregados na atualidade.

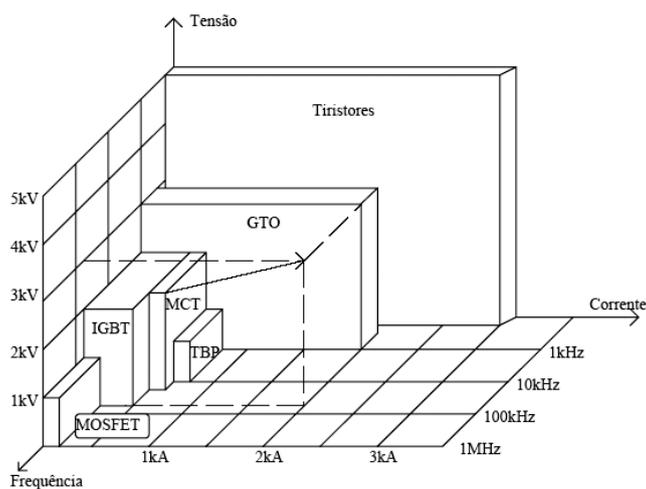


Figura 2.1. Componentes semicondutores de potência: limites seguros de operação [12].

Obviamente estes limites evoluem com o desenvolvimento tecnológico e servem como uma ilustração para a verificação, numa primeira aproximação, das faixas de potência em que cada componente pode ser utilizado, sem exceder esses limites e comprometer o seu bom funcionamento e conseqüentemente sua vida útil.

Observa-se que o tiristor é o dispositivo que possui a maior tolerância tanto ao nível de tensão como ao nível de corrente, e é o componente que será empregado no presente trabalho para construção do conversor bidirecional.

2.3. Modulação PWM - Pulse Width Modulation (Modulação Por Largura de Pulso)

Via de regra, os conversores CC CC operam a partir de uma fonte de tensão CC de valor fixo, enquanto na saída tem-se também uma tensão, mas de valor distinto (fixo ou não). As chaves semicondutoras estão ou no estado bloqueado ou em plena condução. A tensão média de saída depende da relação entre o intervalo em que a chave permanece fechada e o período de chaveamento.

Define-se ciclo de trabalho ou razão cíclica D , como sendo a relação entre o intervalo de condução da chave t e o período de chaveamento T , para uma forma de periódica.

$$D = \frac{t}{T} \quad (2.1)$$

Tome-se como exemplo a figura 2.2, na qual se ilustra uma estrutura chamada abaixadora de tensão (ou *buck*). Pode-se aplicar o conceito de razão cíclica nesse conversor, dividindo o tempo de fechamento da chave t_T , pelo período total da onda quadrada T .

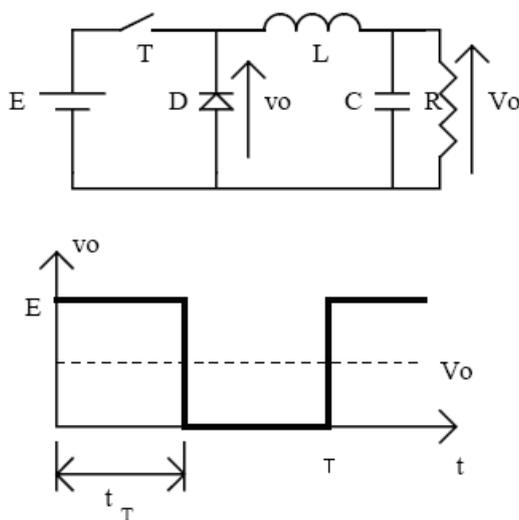


Figura 2.2. Conversor *buck* e forma de onda da tensão aplicada na saída [13].

A modulação *Pulse Width Modulation* - PWM (Modulação Por Largura de Pulso), é o método de controle de chaveamento mais utilizado no controle dos conversores de potência devido a sua simplicidade e eficiência. Já existe no mercado uma ampla variedade de circuitos integrados que permitem produzir modulação PWM

Em PWM opera-se com frequência constante, variando-se o tempo em que a chave permanece ligada. O sinal de comando é obtido, geralmente, pela comparação de um sinal de controle (modulante) com uma onda periódica (portadora) como, por exemplo, uma onda "dente-de-serra".

Para que a relação entre o sinal de controle e a tensão média de saída seja linear, como desejado, a frequência da portadora deve ser, pelo menos 10 vezes maior do que a modulante, de modo que seja relativamente fácil filtrar o valor médio do sinal modulado (PWM), recuperando o sinal de controle [13].

PWM LINEAR: A figura 2.3 ilustra a geração de um sinal PWM, através de uma onda "dente-de-serra", com o sinal modulante sendo representado por um nível CC. O número de pulsos dependerá da frequência do sinal de referência, "dente-de-serra", para um período especificado.

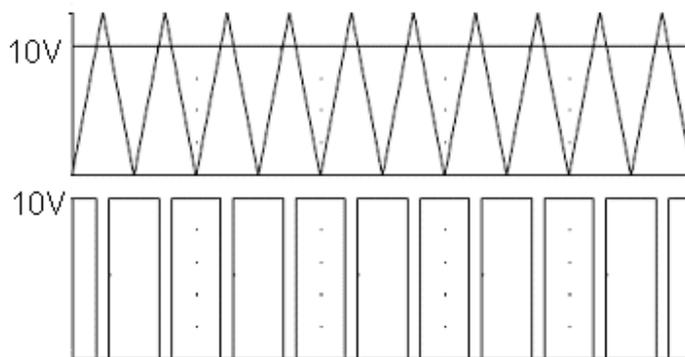


Figura 2.3. Modulação PWM de nível CC.

Pela facilidade de implementação, usa-se normalmente como sinal modulante, um degrau unitário cuja amplitude fornece informações do sistema a que se quer modular.

PWM SENOIDAL: É possível reduzir significativamente o conteúdo harmônico da tensão gerada por um conversor, utilizando-se uma modulação PWM senoidal. Neste caso a frequência da fundamental é definida por uma senóide e a variação da sua amplitude propicia a variação da largura dos pulsos de tensão de carga.

2.4. Circuitos Integrados Empregados em Conversores

Com a popularização e o barateamento dos circuitos integrados, um número crescente de funções dentro das topologias foram sendo substituídas por circuitos integrados. Nesta seção analisaremos alguns destes circuitos integrados, dos mais utilizados, enfatizando suas principais características. Nestes casos, os projetos são geralmente baseados em modelos de pequenos sinais.

2.4.1. O dsPIC30F

O Microcontrolador de Sinal Digital (Digital Signal Controller – DSC) dsPIC30F da Microchip é a mais nova e avançada família de processador, assim como é uma poderosa máquina Harvard RISC (Reduced Instruction Set Computer) modificada de 16 bits que combina as vantagens do controle dos microcontroladores de 16-bits de alto desempenho, com uma altíssima velocidade de computação do processador de sinal digital, DSP (Digital Signal

Processor), completamente implementado para produzir uma solução de instrução única firmemente acoplada em um só chip.

O microcontrolador dsPIC30F usa uma arquitetura Harvard modificada com programas separados e barramentos de memória de dados, a qual pode ser observada na figura 2.4.

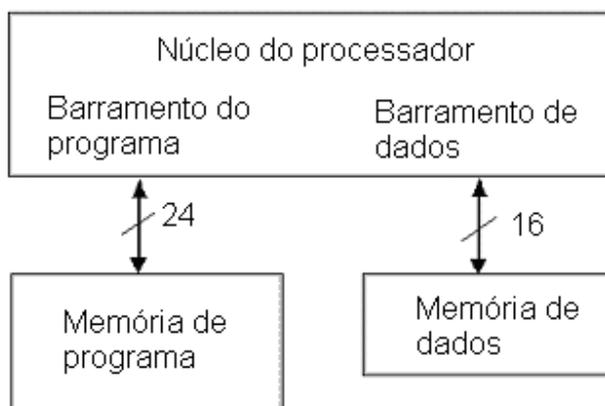


Figura 2.4. Separador de dados e barramento do programa.

Estes dispositivos trabalham em alta velocidade, acima de 30 MIPS – milhão de informações por segundo, e são muito eficientes para programação em C, possuindo poderosos periféricos como: memória flash, memória regravável de dados e uma variedade de bibliotecas de softwares que permitem um alto desempenho no desenvolvimento de soluções embarcadas, projetos altamente robustos em um tempo extremamente reduzido.

2.4.2. O Circuito Integrado UC 3524 – Gerador de PWM [14]

O circuito integrado UC 3524 é um modulador por largura de pulso, que possui algumas características e periféricos que o tornam de grande utilidade para esta aplicação.

Dentre as suas principais características, pode-se citar:

- Possui uma tensão de referência regular de $5,1\text{ V} \pm 1\%$;
- Oscilador interno com operação de 100 Hz a 500 kHz;
- Amplificador interno (possibilita a colocação de um compensador);
- Acesso direto ao pino de entrada do comparador (o que permite a colocação de outros compensadores em paralelo);
- *Soft-start* interno (circuitos de partida progressiva).

Os componentes utilizados para a polarização do circuito integrado UC 3524 formam então o comparador de tensão, os componentes do oscilador, o capacitor de partida progressiva, além dos diodos colocados na saída.

Na figura 2.5 pode-se observar o diagrama de ligação do CI UC 3524.

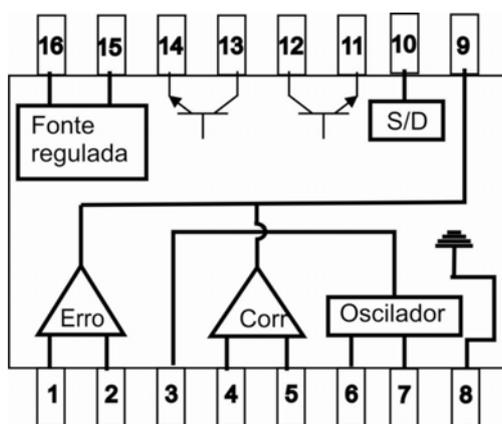


Figura 2.5. Circuito integrado UC 3524 e seu diagrama de ligação.

UC3524 é um regulador PWM amplamente conhecido e utilizado pela indústria devido ao grande número de funções que encontram-se disponíveis.

Entre essas funções, pode-se citar:

- Duas saídas complementares (com coletor aberto);
- Oscilador programável;
- Amplificador de erro;
- Fonte de referência.

2.4.3. O Circuito Integrado TCA 785 – Disparo de Tiristor

Todo circuito de disparo, em retificadores controlados, deve ser sincronizado com a tensão de rede, ou ocorrerá o disparo aleatório dos tiristores, uma vez que cada pulso será aplicado num instante diferente, que não está relacionado com a tensão da rede.

O TCA 785 é um dispositivo próprio para o disparo de tiristores. Inicialmente, é interessante analisar algumas partes de seu circuito interno, como ilustra a figura 2.6.

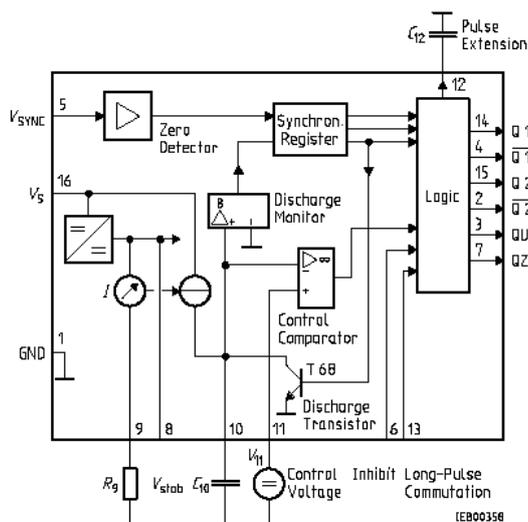


Figura 2.6. Diagrama de blocos do TCA 785 [15].

Um ponto de referência para sincronismo é a passagem da rede por zero. Isto ocorre a cada 8,33 ms, aproximadamente, em redes de 60 Hz. No TCA 785, existe um detector de passagem por zero, que gera um pulso de sincronismo toda vez que a tensão da rede passa por zero. A entrada de tensão de referência de sincronismo é no pino 5.

A base de sincronismo é um gerador de rampa, cuja característica é ajustada por R_9 e C_{10} , nos pinos 9 e 10, respectivamente. O gerador de rampa fornece uma tensão que varia linearmente com o tempo. A tensão da rampa V_{10} é comparada com a tensão de controle V_{11} , no pino 11 do TCA 785.

Em um instante t_0 , correspondente ao ângulo de disparo α em relação ao sinal da rede, quando as tensões se igualarem ($v_{10} = v_{11}$), a mudança de estado na saída do bloco comparador de disparo indicará ao bloco Lógico que um pulso de disparo deve ser acoplado a uma de suas saídas.

O TCA 785 possui uma saída Q_1 (pino 14) e outra Q_2 (pino 15) defasadas em 180° . Enquanto Q_1 serve para disparar um SCR no semiciclo positivo, Q_2 pode ser usada para disparar um segundo SCR no semiciclo negativo.

Além disso, se o pino 12 estiver aberto, assim que a rampa se igualar à tensão de controle (pino 11), será acoplado um pulso de duração de $30 \mu\text{s}$ na saída Q_2 , se a tensão estiver no semiciclo positivo. Caso a tensão da rede esteja no semiciclo negativo, o pulso será acoplado

na saída Q_1 , para haver o sincronismo necessário com as outras duas tensões, no caso de entrada de tensão trifásica.

No entanto, se o pino 12 estiver curto-circuitado a terra, a largura dos pulsos será fixa, estendendo-se do instante do disparo até o início do próximo semiciclo. Isso é utilizado para garantir o disparo do tiristor em aplicações com carga indutiva.

2.4.4. Circuito de *Drivers*

Para que o acionamento dos interruptores dos conversores de energia seja realizado de maneira adequada, geralmente são utilizados os chamados circuitos *drivers*. Desta forma garante-se não só o acionamento com maior capacidade de corrente como também o isolamento dos comandos.

A função principal deste circuito é a de ser uma interface entre os diversos dispositivos de potência e os sinais disponíveis na saída do circuito modulador. Com isso ele otimiza o sinal de disparo, tornando o mais adequado ao acionamento dos dispositivos.

Os circuitos de *drivers* são uma evolução dos antigos transformadores de pulsos, utilizados para fazer o isolamento entre o circuito de potência e o circuito de disparo. O resultado dessa solução passa por estágios de comparação, isolamento e amplificação para o acionamento dos dispositivos semicondutores.

2.5. Circuitos de Ajuda a Comutação

O objetivo destes circuitos é evitar problemas advindos de excessivos valores para dv/dt (variações instantâneas tensão) e di/dt (variações instantâneas de corrente) provocado pelo aumento da frequência de chaveamento dos conversores. Em sua forma original, as topologias dos conversores apresentam suas comutações dissipativas.

Para elevar o rendimento da estrutura, um circuito de ajuda à comutação é normalmente introduzido, representado uma das fases do conversor. Os circuitos adotados possuem características muito interessantes, já que é composto apenas por componentes passivos e permite o natural reaproveitamento da energia armazenada nos capacitores e indutores de comutação.

Na figura 2.7 é possível observar a sobretensão e a oscilação provocada nos terminais de um MOSFET de potência por ocasião da comutação. Esses fenômenos sobrecarregam o dispositivo semicondutor, diminuindo sua vida útil, e compromete a eficiência da estrutura pela perda de potência no chaveamento.

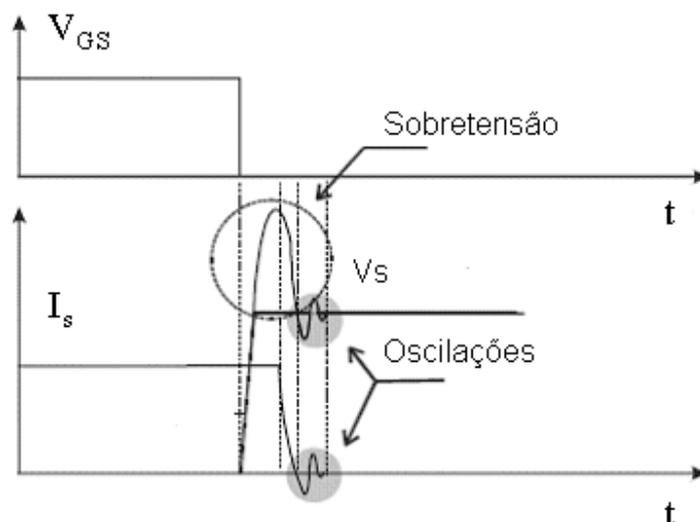


Figura 2.7. Oscilação e sobre tensão provocada por indutância e capacitância parasitas do circuito, durante o bloqueio de um dispositivo semicondutor controlado [16].

Durante a comutação, a tensão e a corrente através do dispositivo semicondutor devem permanecer dentro da região denominada de Área Segura de Operação (SOA-Safe Operating Área). Para que isto ocorra são utilizadas várias técnicas de comutação suave, descritas a seguir.

2.6. Comutação ZCS e ZVS

Os conversores ZVS caracterizam-se por apresentarem comutação sob tensão nula para a chave principal, enquanto que os conversores ZCS operam com comutação sob corrente nula para a chave principal.

Nos dois métodos se tem uma potência de dissipação nula nos terminais da chave principal no momento da comutação, uma vez que uma das variáveis de corrente ou tensão seria induzida à zero, pela atuação de circuitos auxiliares, para esse instante. É grande a economia de potência obtida, com a introdução desses circuitos de ajuda a comutação.

Um aperfeiçoamento das técnicas de chaveamento sob tensão nula foi proposta posteriormente, denominada de transição sob tensão nula (ZVT – Zero Voltage Transition). Esta técnica apresenta todas as vantagens presentes na comutação ZVS, tendo como principal diferença a ausência de elementos auxiliares no caminho do fluxo de potência do conversor.

A figura 2.8 descreve a forma de onda da chave principal de um conversor *boost*, para as comutações ZVS, visando à minimização dos efeitos das capacitâncias parasitas presentes na junção deste. Observa-se neste caso que a superposição de corrente e tensão, no momento da condução é evitada, diminuindo a dissipação de potência na estrutura.

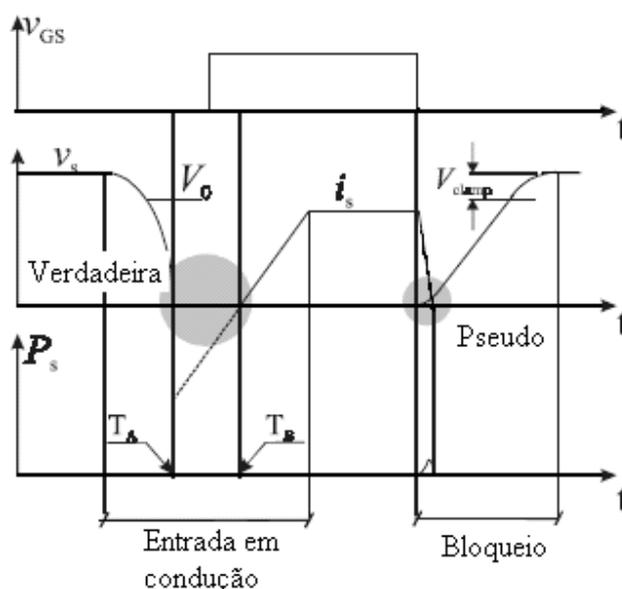


Figura 2.8. Forma de onda da chave principal: ZVS-PWM [16].

Isto faz com que não haja esforços adicionais de tensão nos elementos principais e, além disto, os elementos auxiliares, acionados somente nos intervalos de comutação, manipulam uma fração da potência total entregue para a carga podendo ser dimensionados para valores menores de potência.

Embora apresente vantagens significativas com relação aos conversores ZVS propostos até então, este conversor proposto, apresenta como principal contratempo a comutação inadequada da chave auxiliar. Muitas outras topologias empregando esta técnica de comutação foram propostas com algumas modificações visando superar os problemas presentes na topologia original e com isto, obter desempenhos ainda melhores.

Baseado no princípio dos conversores ZVT foi proposto um conversor que apresentava as vantagens presentes nos conversores ZCS, porém, sem nenhum elemento auxiliar no caminho do fluxo de potência do conversor. Este conversor foi denominado conversor com transição sob corrente nula (ZCT – Zero Current Transition).

2.7. Modelo Matemático da Célula Solar

O efeito fotovoltaico consiste na propriedade de alguns materiais de apresentarem uma D.D.P. (diferença de potencial) quando atingidos por raios de luz. O material mais largamente utilizado para construção de células fotovoltaicas é o silício, embora recentemente outros materiais como o Arsenieto de Gálio e Sulfeto de Cádmio, tenham sido utilizados.

Os painéis de silício cristalino apresentam um rendimento entre 10% e 13% na conversão da radiação solar em energia, enquanto no silício amorfo este rendimento fica por volta de 9%. No entanto estes apresentam a vantagem de serem mais abundantes, tornando a sua fabricação mais econômica.

Os painéis fotovoltaicos são construídos em valores padrões de tensão e potência, de forma que normalmente é necessária a sua associação em série ou paralelo para obtenção dos valores requisitados no projeto.

A característica de saída de um painel fotovoltaico típico é ilustrada na figura 2.9, para dois valores de radiação solar.

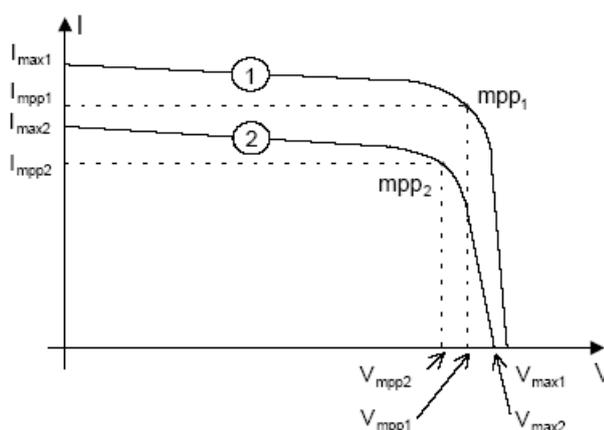


Figura 2.9. Característica de saída tensão x corrente de um painel fotovoltaico típico para dois valores de radiação solar com temperatura constante [17].

Para um valor específico de incidência solar, representado pela curva 1, têm-se um ponto onde é possível obter a máxima potência do painel. Este ponto é denominado de ponto de máxima potência (MMP → maximum power point).

Na curva 2, para um nível de insolação diferente, o MMP é obtido em outro ponto.

Conclui-se então que para cada nível de radiação solar que atinge o painel existe um ponto de máxima potência. O rendimento do painel fotovoltaico também sofre a influência da temperatura na junção PN do material semiconductor que compõem o painel.

A potência no ponto de máxima potência, pode ser calculada multiplicando-se a tensão V_{mpp} pela corrente I_{mpp} . Gráficamente esta potência é a área interna definida pelas linhas pontilhadas de V_{mpp} e I_{mpp} .

Existe uma característica importante que afeta o desempenho de arranjos que utilizam a energia proveniente do sol que é a variação da intensidade da luz solar em função do horário e das estações do ano. Isto significa que a energia disponível em tais sistemas pode variar no decorrer do ano, devido à quantidade de radiação solar variar de acordo com a estação do ano. Quanto mais longe se está do equador, maior é a amplitude da variação da luz solar, para um determinado lugar.

Uma célula fotovoltaica pode ser representada por um circuito equivalente composto por um gerador de corrente, um diodo sensível à luz, uma resistência série e uma resistência shunt, conforme ilustrado na figura 2.10.

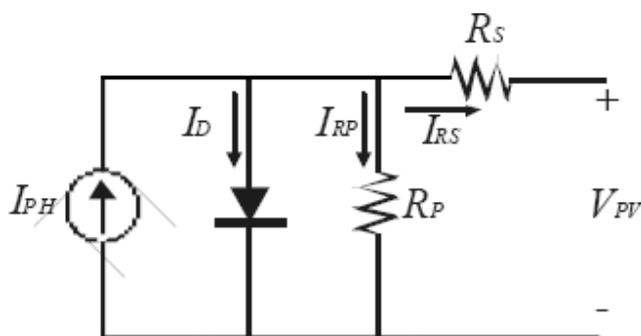


Figura 2.10. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A partir deste circuito, podem-se descrever as seguintes equações:

$$I_{PH} = I_D + I_{RP} = I_{RS} \quad (2.2)$$

$$I_{PH} = I_0 \left(e^{\frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{V_T}} \right) + I_{PV} + \frac{(V_{PV} + R_S I_{PV})}{R_p} \quad (2.3)$$

Em que:

I_{PH} : Gerador de foto corrente;

I_D : Corrente de fotodiodo;

I_{RP} : Corrente da resistência shunt;

I_{RS} : Corrente da resistência série;

R_p : Resistência shunt;

R_s : Resistência série;

I_{PV} : Corrente do gerador;

V_{PV} : Tensão do gerador.

Considerando que R_p é muito grande, uma aproximação para equação (2.3), será:

$$V_{PV} = V_T \ln \left(\frac{I_{PH} - I_{PV}}{I_0} + 1 \right) - R_S I_{PV} \quad (2.4)$$

A equação (2.4) define a característica da célula fotovoltaica, pois relaciona suas duas variáveis principais, corrente e tensão, em seus terminais.

Da equação (2.4), fazendo $I_{pv} = 0$, então $V_{pv} = V_{oc}$ e $I_{ph} = I_{sc}$, e supondo que:

$$V_{OC} = V_T \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad (2.5)$$

$$I_0 = I_{SC} e^{-\frac{V_{oc}}{V_T}} \quad (2.6)$$

Obtêm-se:

$$I_{PV} = I_{SC} \left(1 - e^{\frac{(V_{PV} - V_{OC} + I_{PV} R_S)}{V_T}} \right) \quad (2.7)$$

$$V_{PV} = V_{OC} + V_T \left(\frac{\ln(I_{SC} - I_{PV})}{I_{SC}} \right) - I_{PV} R_S \quad (2.8)$$

As equações (2.7) e (2.8), relacionam as duas variáveis de interesse em uma célula fotovoltaica, corrente e tensão em seus terminais, respectivamente.

2.8. Conclusão

Os principais dispositivos semicondutores de potência empregados atualmente na construção dos modernos equipamentos de eletrônica de potência são MOSFET de potência, IGBT e o SCR. A seleção de um dispositivo semicondutor, para emprego em um conversor, depende principalmente da corrente, tensão e frequência a que os componentes vão ser submetidos.

Por sua simplicidade e tolerância a uma ampla faixa de valores de corrente e tensão o tiristor foi o componente escolhido no presente trabalho, para construção do conversor bidirecional que vai realizar as funções de retificação e inversão na fonte de energia proposta, para pequenas estações de telecomunicações.

O MOSFET de potência, devido ao seu desempenho em altas frequências, já é uma solução consagrada e será utilizado na construção dos demais conversores empregados na estrutura.

Os circuitos de ajuda a comutação ou amaciadores, que reduzem as perdas de potência em cima dos componentes, com a elevação da frequência de chaveamento, pela anulação de uma das variáveis de tensão ou corrente, no instante da comutação, é um importante recurso a ser utilizado pelos projetistas na construção dos conversores de energia.

3 ESTRUTURAS CONVERSoras DE ENERGIA

3.1. Introdução

É sabido que a distribuição de energia elétrica é feita, exceto em raras exceções, em corrente alternada. No entanto, sabe-se também que para muitas aplicações, principalmente para a alimentação de equipamentos de telecomunicações, necessita-se desta energia disponível em corrente contínua.

Neste capítulo será feita uma abordagem teórica dos conversores mais empregados, no desenvolvimento dos dispositivos de telecomunicações, visando fornecer subsídios para a escolha daquelas topologias que melhor atendem aos requisitos inicialmente proposto para fonte.

No início do estudo é feita uma abordagem simples dos principais conversores CC CC (reguladores de tensão), seguindo para os conversores CC CA (inversores de tensão) e culminando com a análise dos conversores CA CC (retificadores).

3.2. Conversores CC CC

Visando-se a definição da estrutura CC CC a ser utilizada nos conversores, apresentam-se brevemente quatro conversores: *buck*, *boost*, *buck-boost* e *cuk*, todos entre os mais estudados pela literatura específica.

3.2.1. Conversor Abaixador de Tensão – *Buck*

A figura 3.1 ilustra esta topologia.

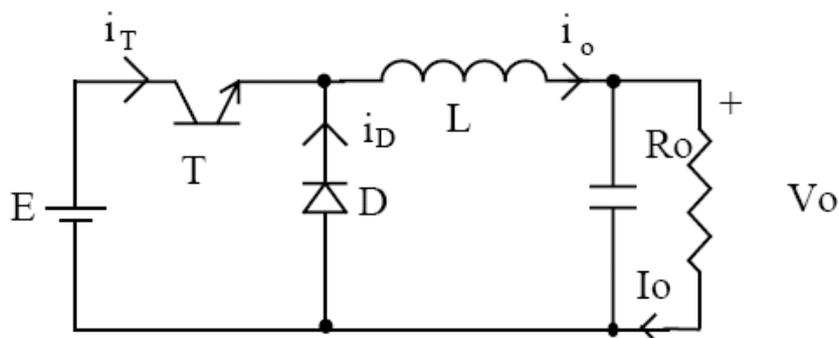


Figura 3.1. Conversor abaixador de tensão - *buck*.

A tensão de entrada (E) é comutada pela chave representada pelo transistor T. Considerando V_0 constante, pela filtragem do capacitor de saída, temos a ondulação da corrente de carga desprezível.

Pelo desligamento do transistor T, o diodo inicia a condução, dando continuidade à corrente do indutor. Neste momento o indutor devolve a energia armazenada ao capacitor e à carga. Parte da energia armazenada no indutor serve para a carga do capacitor. Quando a corrente no indutor diminuir, o capacitor começa a se descarregar, completando a diferença de tensão, a fim de manter a corrente da carga constante, considerando a tensão V_0 constante.

A sua função de transferência, que relaciona as tensões de entrada e saída é dada de acordo com:

$$V_0 = V_i \cdot D \quad (3.1)$$

3.2.2. Conversor Elevador de Tensão – *Boost*

A estrutura básica de um conversor CC CC elevador de tensão *boost* está ilustrado na figura 3.2, como fonte de corrente e como fonte de tensão.

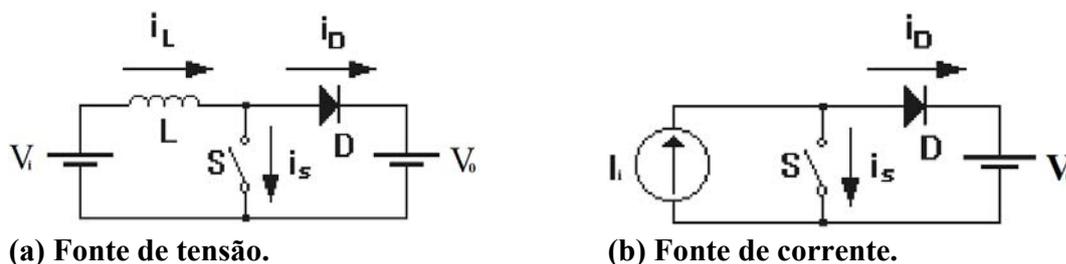


Figura 3.2. Conversor elevador de tensão - *boost*.

Sejam as formas de onda representadas na figura 3. 3.

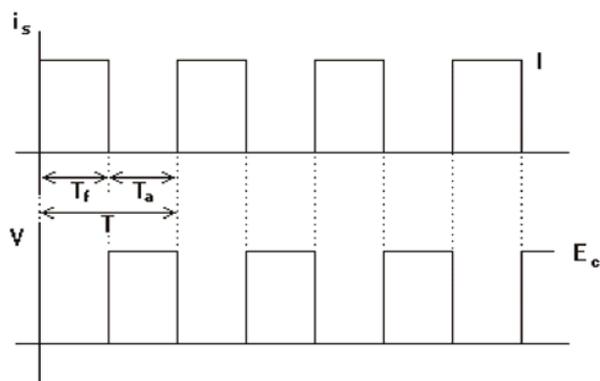


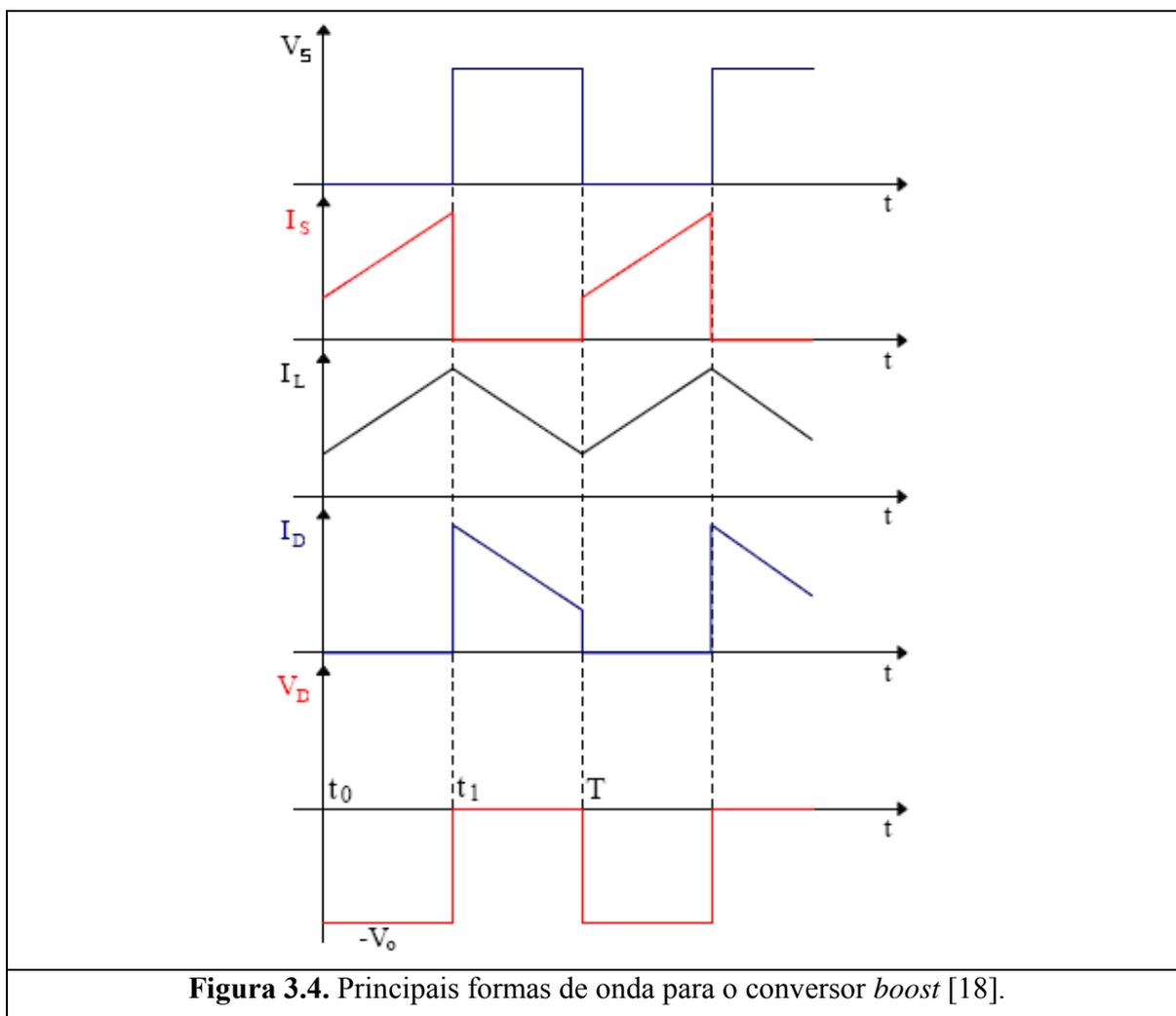
Figura 3.3. Formas de onda para a chave do conversor *boost*.

O interruptor opera com frequência fixa e razão cíclica variável. A razão cíclica está relacionada com o valor de tensão que se deseja na saída do conversor.

Considerando o conversor ideal, temos, para sua função de transferência:

$$V_0 = V_I \cdot \frac{1}{(1-D)} \quad (3.2)$$

O conversor pode operar em dois modos de condução, quanto a corrente no indutor. No caso da condução contínua, a corrente pelo indutor nunca se anula. Na figura 3.4 são apresentadas as principais formas de onda, para este tipo de operação.



3.2.3. Conversor *Buck-Boost*

Este tipo de conversor combina os conceitos do *buck* e do *boost*. A tensão de saída pode ser mais alta, igual ou menor do que a tensão de entrada.

Quando a chave representada pelo transistor T é chaveada, o indutor é carregado pela fonte de tensão E. Neste intervalo o diodo não conduz e o capacitor alimenta a carga, a figura 3.5 ilustra o circuito.

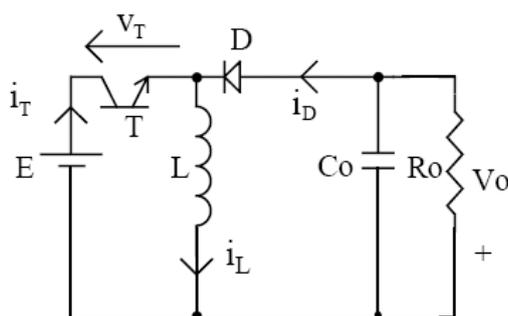


Figura 3.5. **Conversor abaixador elevador de tensão - *Buck-Boost* [19].**

Quando o transistor T desliga, a continuidade da corrente do indutor se faz pela condução do diodo. A energia armazenada em L é repassada ao capacitor e à carga. As correntes de entrada e saída são descontínuas. A tensão a ser suportada pelo diodo e pelo transistor é a soma das tensões de entrada e de saída, $V_0 + E$.

Sua função de transferência pode ser encontrada de acordo com:

$$V_0 = \frac{D}{1-D} \cdot E \quad (3.3)$$

3.2.4. Conversor *Cuk*

Este conversor apresenta uma particularidade em relação aos demais. A transferência de energia da fonte para a carga é realizada por intermédio de um capacitor, tornando necessário o uso de um componente que suporte corrente elevada.

Devido à presença dos dois indutores, as correntes de entrada e saída podem ser contínuas, o que é uma vantagem. Além disso, os dois indutores estão submetidos ao mesmo valor instantâneo de tensão, podendo ser construído em um mesmo núcleo, permitindo equilibrar as correntes e eliminar a ondulação. A chave interruptora deve suportar a soma das tensões de entrada e saída.

Com o interruptor desligado, i_{11} e i_{12} retornam pelo diodo. O capacitor C_1 se carrega, recebendo energia do indutor L_1 . A energia armazenada em L_2 alimenta a carga, neste momento. Quando o interruptor é ligado, o diodo D corta e i_{11} e i_{12} retornam por T. Como $V_{c1} > V_0$, C_1 se descarrega, transferindo energia para L_2 e para a saída. L_1 acumula energia provinda da fonte.

A topologia deste conversor é ilustrada na figura 3.6.

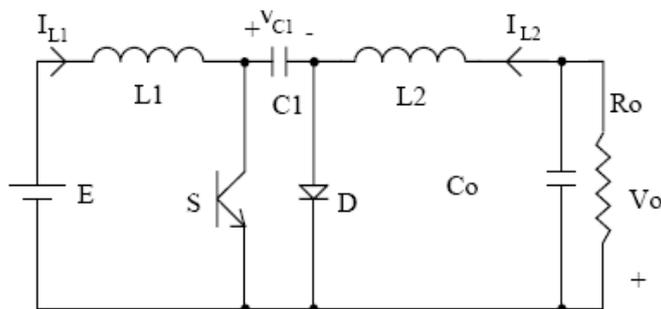


Figura 3.6. **Conversor *cuk*** [19].

Sua função de transferência é dada por:

$$V_0 = \frac{D}{1-D} \cdot E \quad (3.4)$$

3.2.5. Comparação e Escolha entre Conversores CC CC

Entre os conversores analisados, o conversor *boost* é o que preenche os requisitos de elevação da tensão de entrada, com a estrutura mais simples e que utilize menos componentes possíveis.

O conversor *boost*, de acordo com a equação (3.2), pode funcionar como um transformador elevador de tensão contínua. A medida que o seu ciclo de trabalho se aproxima de zero, a tensão de saída V_0 se igualará a tensão de entrada V_i . Por outro lado, quando o ciclo de trabalho se aproximar da unidade a tensão de saída tenderá ao infinito.

Para este tipo de aplicação, de elevação de tensão contínua, o conversor *boost* é o mais amplamente utilizado e será o escolhido no presente trabalho, para construção dos reguladores de tensão.

3.3. Retificadores Trifásicos Tradicionais

A quantidade de topologias existentes para retificadores controlados de médias e de altas potências é enorme, e uma análise exaustiva foge ao objetivo deste trabalho. Duas das topologias consideradas mais importantes, no entanto, são brevemente apresentadas e analisadas a seguir. Os circuitos e suas correspondentes formas de onda são estudados, de forma a exemplificar o funcionamento de cada retificador.

3.3.1. Ponte Semicontrolada Trifásica

É uma ponte de retificação composta de 3 diodos e três tiristores. Portanto é considerada uma ponte mista, pois só se tem o controle em uma parte da estrutura.

O circuito da ponte semicontrolada trifásica é mostrado na figura 3.7.

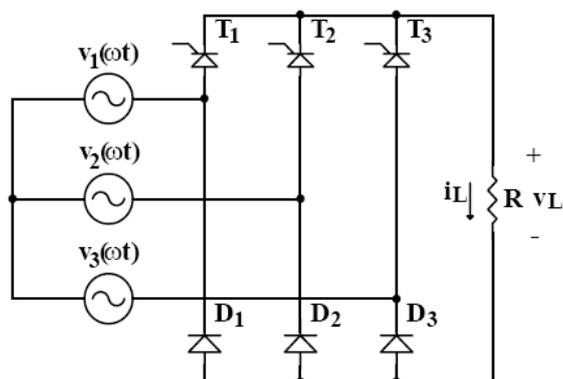


Figura 3.7. **Ponte semicontrolada trifásica [20].**

Entre as suas principais características, pode-se citar:

- Operação em apenas um quadrante – tensão e corrente positivas;
- Circuitos de comandos mais simples;
- Redução custo com o emprego de apenas 3 tiristores.

As formas de onda para um ângulo de disparo pequeno são mostradas na figura 3.8.

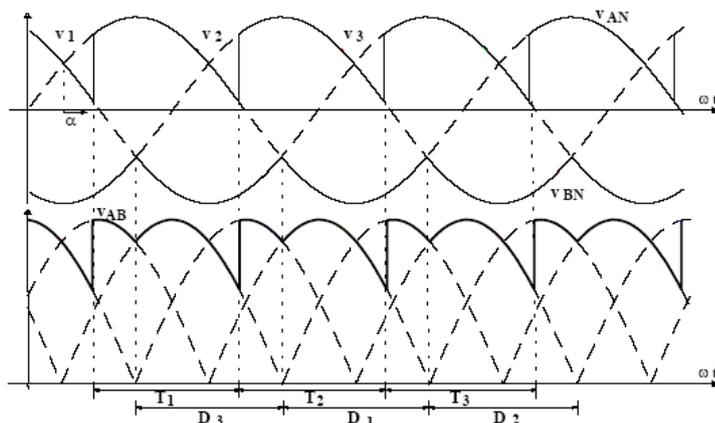


Figura 3.8. **Formas de onda para condução contínua na ponte trifásica mista [20].**

Para uma carga de natureza indutiva e um ângulo de disparo α menor que 60° , não ocorrem períodos de roda livre e a tensão instantânea de saída é sempre positiva. Com o

ângulo de disparo α maior que 60° ocorrem os intervalos de roda livre e a tensão instantânea pode torna-se nula em alguns intervalos.

O valor médio da tensão de saída em função do ângulo de disparo α , e dado por:

$$V_0 = \frac{3}{2\pi} V_{L(MAX)} (1 + \cos \alpha) \quad (3.5)$$

Onde $V_{L(MAX)}$ é a tensão máxima de linha. O valor médio da corrente por tiristor é:

$$I_{SCR} = \frac{I_0}{3} \quad (3.6)$$

Uma evolução dessa estrutura é o uso do diodo de circulação ou roda livre, para cargas fortemente indutivas. Seu diagrama é ilustrado na figura 3.9.

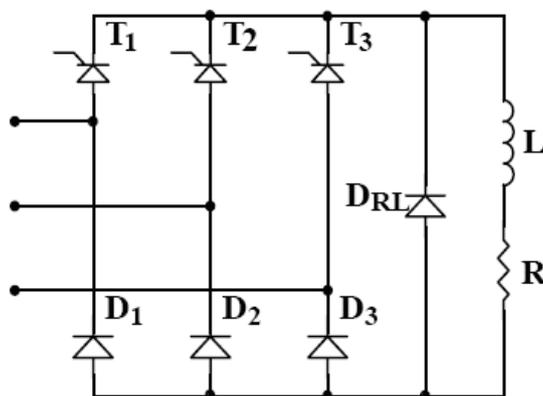


Figura 3.9. Ponte mista com diodo de circulação [20].

3.3.2. Ponte Totalmente Controlada Trifásica

Este é um tipo de conversor que permite o fluxo de potência nos dois sentidos da ponte retificadora. Entre as suas características pode-se citar:

- O valor médio da tensão na carga varia de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores;
- O ângulo de disparo é medido a partir do cruzamento das tensões de fase;
- Cada tiristor permanece ligado 120° e a cada 60° dois conduzem simultaneamente.

Portanto esta é uma ponte totalmente controlada, composta de seis tiristores, conhecida também, como ponte de *GRAETZ* a tiristor.

Seu circuito é ilustrado na figura 3.10.

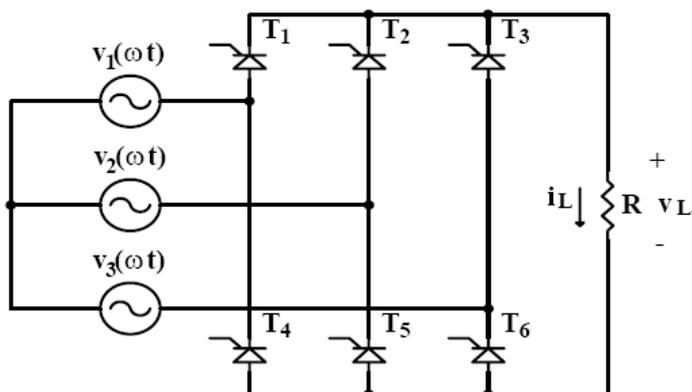


Figura 3.10. Ponte de *GRAETZ* a tiristor.

Para este tipo de estrutura pode-se ter o funcionamento com dois tipos de carga:

(a) Funcionamento com Carga Resistiva

No caso da carga conectada a saída da estrutura ter natureza puramente resistiva, a tensão média na carga é dada por:

PARA $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$:

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \cdot V_{L(MAX)} \cdot \cos \alpha \quad (3.7)$$

PARA $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$:

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \cdot V_{L(MAX)} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (3.8)$$

PARA $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$:

$$V_0 = 0 \quad (3.9)$$

A corrente média por tiristor é dada por:

$$I_{SCR} = \frac{I_0}{3} \quad (3.10)$$

Onde I_0 representa a corrente média na carga, calculada a partir da tensão, encontrada pela aplicação da equação (3.7) ou equação (3.8).

O valor nominal da tensão de pico reversa dos tiristores é igual à tensão máxima de linha. Valor útil no dimensionamento do tiristor adequado para uma determinada aplicação.

No gráfico da figura 3.11, observa-se a evolução do valor da tensão média na carga em função do ângulo de disparo, para uma carga resistiva.

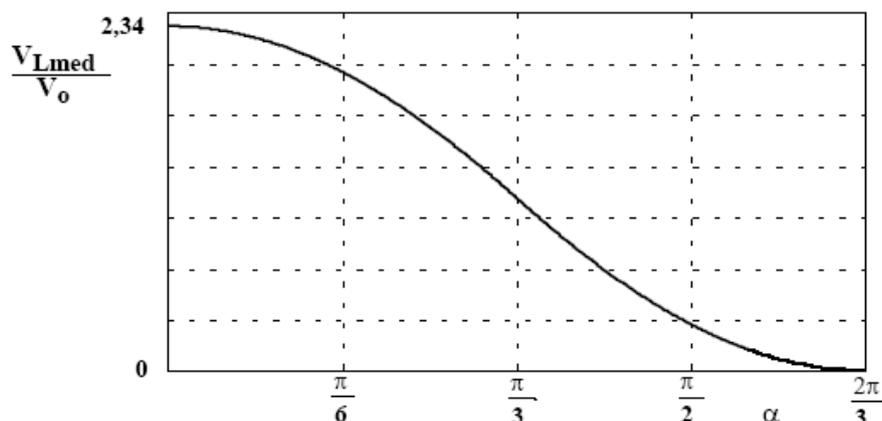


Figura 3.11. Tensão média na carga em função do ângulo de disparo α [20].

Observa-se que à medida que este ângulo aumenta a tensão tende a zero.

(b) Funcionamento com Carga Indutiva

O retificador em ponte completa totalmente controlado é usado, frequentemente em aplicações em que a carga é altamente indutiva. A indutância presente na carga faz com que a forma da corrente de saída se assemelhe com uma curva CC pura. Para um ângulo de disparo maior que 90° , o conversor pode funcionar como inversor, com a tensão de saída se apresentando negativa conforme ilustrado na figura 3.12.

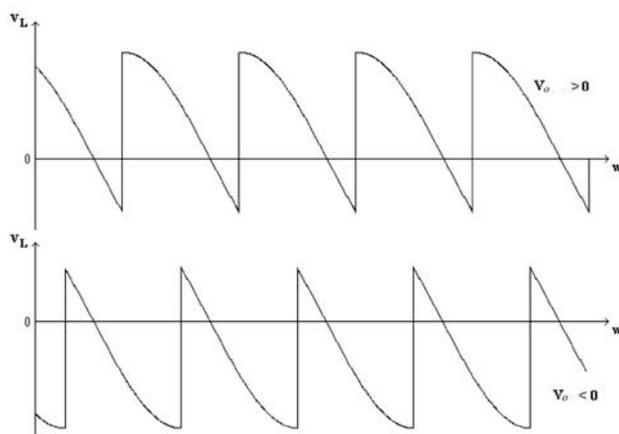


Figura 3.12. Carga indutiva e operação como retificador ou inversor

Para um ângulo $\alpha = 0$, a tensão de saída é máxima.

Para um ângulo $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$, o conversor opera como retificador.

Para um ângulo α maior que 90° , este mesmo conversor pode operar como inversor, transferindo potência da carga para a fonte.

A tensão média na saída para este tipo de carga em função do ângulo de disparo é dada por:

PARA $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$:

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \cdot V_{L(MAX)} \cdot \cos \alpha \quad (3.11)$$

A tensão na saída é sempre positiva e a corrente de saída é contínua:

PARA $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$:

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \cdot V_{L(MAX)} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (3.12)$$

Neste caso a tensão de saída se torna negativa para partes do ciclo.

A corrente média por tiristor, como no caso do retificador semicontrolado é dada por um terço da corrente média de saída:

$$I = \frac{V_o}{3 \cdot R_0} \quad (3.13)$$

A tensão inversa máxima aplicada sobre um tiristor, é igual à amplitude instantânea máxima de tensão de linha CA. Deve-se lembrar que o tiristor, nestes casos, deve ser capaz de bloquear tensões diretas. Quanto maior o ângulo de disparo, maior a tensão direta que o tiristor terá que suportar.

3.4. Inversores de Tensão

Os inversores de tensão são conversores estáticos destinados a controlar o fluxo de energia elétrica entre uma Fonte de Tensão Contínua e uma Carga em Corrente Alternada monofásica ou polifásica, com controle dos níveis do valor eficaz da tensão e da frequência, dependendo da aplicação.

3.4.1. Inversor Monofásico em Ponte

Destina-se a aplicações que envolvem cargas monofásicas, pois só permite a obtenção, na sua saída, de uma única fase.

Uma das estruturas mais simples é a do inversor monofásico em ponte, que dispensa na sua construção, a utilização de transformadores.

A figura 3.13 mostra o diagrama de um inversor monofásico em ponte, alimentando uma carga resistiva. Os interruptores são comandados no fechamento e na abertura, através de um comando externo sincronizado.

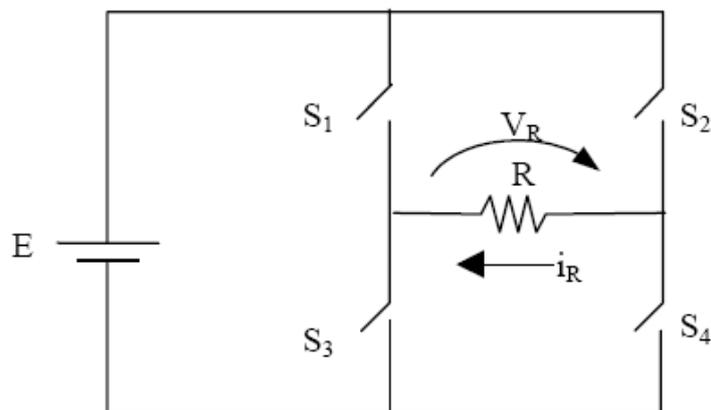


Figura 3.13. **Inversor monofásico em ponte com carga resistiva.**

Na estrutura da figura 3.13, tem-se:

- S_1 , S_2 , S_3 e S_4 – Interruptores comandados;
- R - Resistência de carga;
- E - Fonte de alimentação.

As formas de onda correspondentes estão representadas na figura 3.14.

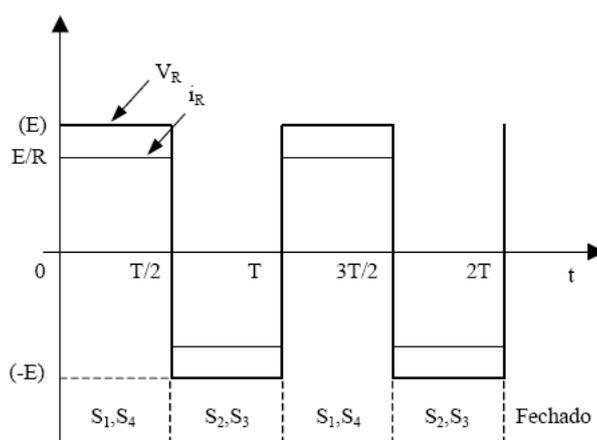


Figura 3. 14. **Tensão e corrente de carga para o inversor monofásico onda completa com carga resistiva.**

Quando S_1 e S_4 conduzem a tensão de carga V_R é igual a E .

Quando S_2 e S_3 conduzem, a tensão de carga torna-se igual a $-E$.

Se a carga for indutiva, devem ser adicionados os diodos de roda livre D_1 , D_2 , D_3 e D_4 , como está representado na figura 3.15, onde também aparecem as 4 etapas de funcionamento da estrutura. Os diodos de roda livre permitem uma comutação mais segura dos interruptores genéricos, diminuindo a tensão em seus terminais, durante o fechamento ou a abertura.

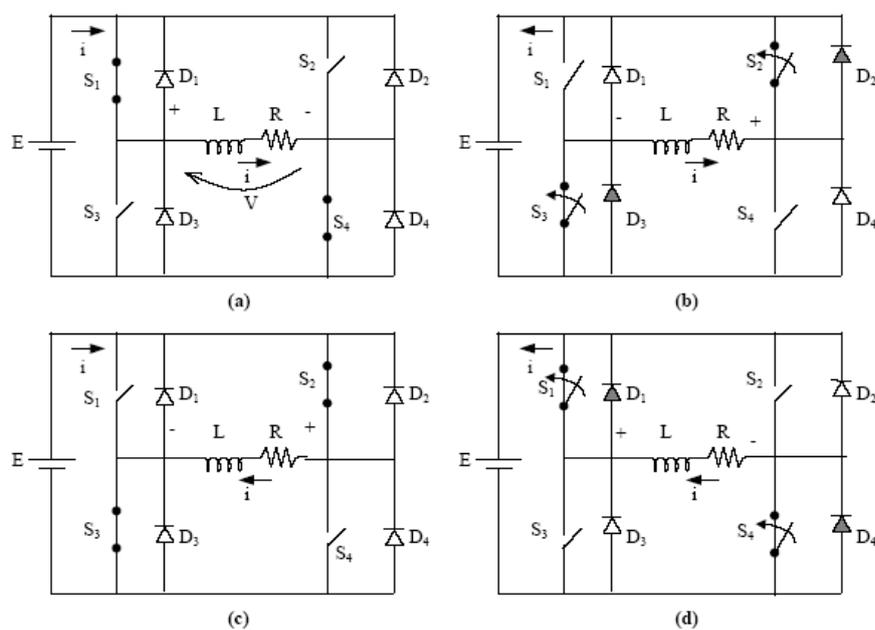


Figura 3.15 Etapas de funcionamento do inversor para carga indutiva [21].

Na figura 3.16 são apresentadas as Formas de onda para o inversor monofásico, onda completa, com carga indutiva.

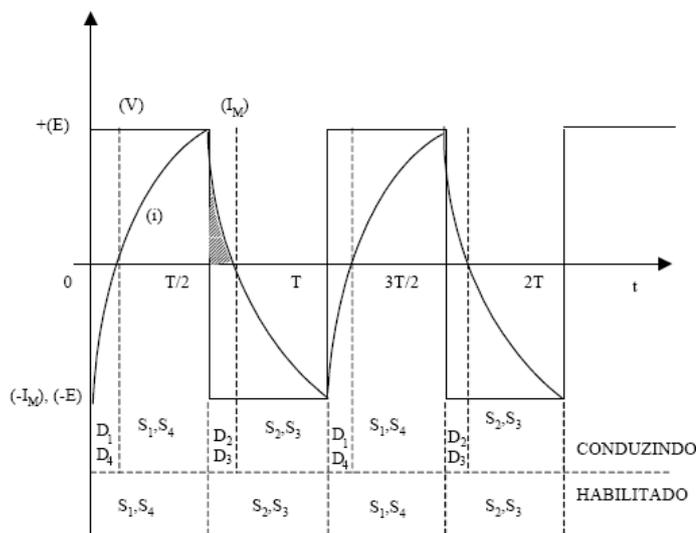


Figura 3.16. Formas de onda para o inversor monofásico de onda completa com carga indutiva [21].

Aqui é possível verificar a atuação dos diodos de roda livre, quando a tensão da fonte passa por zero e troca de polaridade. Esta estrutura, que opera com comutação em baixa frequência, é adequada para aplicações de cargas CC altamente indutivas, devido a sua simplicidade e robustez.

3.4.2. Inversor Trifásico

A estrutura do inversor trifásico está representada na figura 3.17.

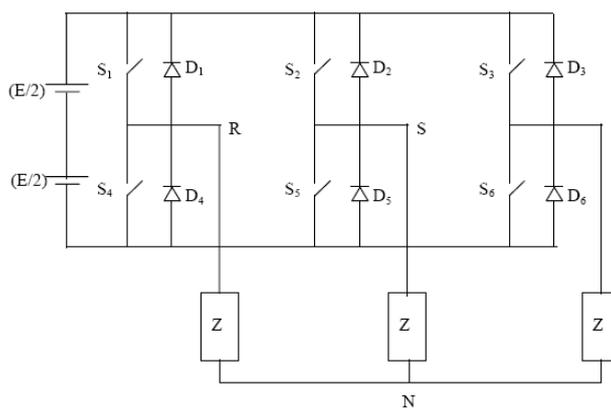


Figura 3.17. Estrutura do inversor trifásico [21].

Na estrutura da figura 4.17, tem-se:

- S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 e S_6 - Interruptores comandados;

- D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 e D_6 - Diodos de regeneração;
- E - Fonte de alimentação;

O diagrama de fases está representado na figura 3.18.

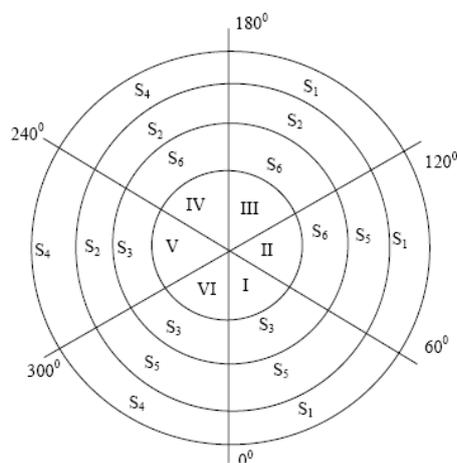


Figura 3.18. **Diagrama de comando do inversor trifásico [21].**

Nesta estrutura, a cada instante, existem 3 interruptores em condução, 2 no grupo positivo e 1 no grupo negativo ou vice-versa. Cada interruptor é mantido habilitado durante 180° , ocorrendo uma comutação a cada 60° .

3.5. Conclusão

O conversor *boost* representa uma solução consagrada e confiável, para aplicações onde se deseja a elevação de tensão CC. Além do que, este pode ser construído utilizando MOSFET de potencia que são dispositivos confiáveis e facilmente encontrados para utilização.

O retificador trifásico de onda completa totalmente controlado representa uma solução interessante, quando se deseja as etapas de retificação e inversão de tensão em sistemas de potencia, pois com uma mesma estrutura pode-se realizar duas conversões de potência: CA CC e CC CA.

4 BATERIAS E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado um estudo geral sobre os diversos tipos de baterias existentes bem como das suas principais características. Este estudo será limitado a uma descrição mais prática, sem inferir em detalhes do funcionamento eletroquímico, ou de equações químicas de reações.

Os métodos de carga receberam um enfoque especial por serem considerados um fator importante na manutenção do bom funcionamento de um banco de baterias

Na seqüência será feita uma descrição das principais características de funcionamento de sistemas fotovoltaicos e dos sistemas de baterias, suas aplicações e suas principais características.

4.2. Conceitos Iniciais Sobre Baterias

Uma bateria é um conjunto de elementos constituído basicamente pelas placas internas, eletrólito e o vaso externo destinado ao armazenamento da energia elétrica. A energia proveniente de uma fonte externa é inicialmente usada para fazer a carga dessas baterias, que fica acumulada podendo ser usada posteriormente para fazer a alimentação de equipamentos consumidores.

As baterias podem ser carregáveis ou não. Para o caso das baterias carregáveis o processo de carga e descarga pode ser repetida inúmeras vezes, limitada pelo tempo de vida útil destas.

O rendimento típico das baterias situa-se por volta de 80%, com isso é necessário sempre carregá-las com uma quantidade de energia superior ao que vai ser efetivamente utilizado posteriormente. A parte da energia não utilizada na carga é perdida na forma de calor. As baterias possuem sua capacidade expressa em Ah.

A capacidade das baterias depende fundamentalmente da corrente solicitada em seus terminais, por exemplo, uma bateria de 100 Ah pode fornecer 100A em uma hora ou pode fornecer 10A em 10h.

Normalmente quanto menor a intensidade das descargas maior é o tempo de vida útil das baterias. Costuma-se dividir as baterias de duas formas: pelo tipo de aplicação e pelo tipo de

construção interna. O uso das baterias é mais difundido nas áreas de automóveis e transporte marítimo.

As baterias para aplicação automotiva são usadas principalmente para a ignição ou partida dos motores de combustão. Neste caso costuma-se otimiza-las para fornecimento de uma elevada corrente de partida, por curtos intervalos de tempo, seguido de uma recarga. Este tipo de bateria possui placas finas e não suportam descargas profundas, sob pena de danificá-las. Normalmente a descarga máxima permitida é de até 5%.

Uma variante da bateria de ciclo curto é a de ciclo profundo destinada a aplicações que requerem grandes quantidades de energia por muito tempo, usadas principalmente em empilhadeiras e carros de tração.

Essas baterias possuem placas internas bem mais grossas para que possam suportar a solicitação de corrente sem comprometer sua vida útil. As baterias estacionárias, usadas em telecomunicações, é outro exemplo de bateria de ciclo longo, onde o uso de energia por longos períodos torna-se necessário.

Existem também as baterias de ciclo intermediário construídas para níveis de descarga em torno de 50%. Suas placas possuem uma espessura intermediária entre baterias de ciclo curto e profundo. As baterias marítimas são um exemplo deste tipo híbrido de baterias.

4.3. Tipos de Baterias

A escolha do tipo de bateria mais adequado para uma determinada aplicação, passa pela análise de fatores como: desempenho, vida útil, custo, segurança adequado e mínimo impacto ambiental desejável. A escolha mais eficiente é aquela que costuma otimizar essas variáveis. As baterias quanto a sua constituição podem ser divididas em:

4.3.1. Níquel-Metal Hídrido

São baterias construídas basicamente por níquel e um outro metal. São baterias de ciclo curto, ou seja, aceitam corrente de descarga em taxas elevadas por breves períodos de tempo. Possuem um ótimo desempenho dentre as tecnologias de baterias mais largamente utilizadas. Também possuem uma faixa de preços economicamente atrativa.

As baterias Níquel-Metal Hídrido permitem uma capacidade de acumulação de energia 50% maior que as baterias de chumbo-ácido.

4.3.2. Lítio-Ion

Precisam de um controle de carga preciso, pois possuem baixa tolerância às altas correntes de carga, por isso precisam de um cuidado mais efetivo no processo de carga e descarga. Mesmo assim, esta classe de bateria possui uma eficiência energética superior àquelas feitas a base de chumbo ou níquel.

Apresentam duas grandes desvantagens: precisam ser aquecidas a 70°C para um desempenho adequado, e os eletrodos metálicos de Lítio tem vida curta, pois a deposição de detritos nas placas pode levar a um curto circuito interno.

4.3.3. Chumbo-Ácido

São as mais largamente utilizadas no momento, devido ao amplo uso no setor automobilístico. As técnicas de fabricação de baterias de chumbo-ácido avançaram muito, e os principais componentes eletroquímicos (chumbo e ácido sulfúrico) são abundantes e baratos. Até recentemente, no entanto, a produção dessas baterias foi otimizada de forma a se reduzir custo, em vez de aumentar desempenho.

Essa classe de bateria tem sido fabricada da mesma maneira há muitas décadas, e têm provado serem confiáveis e baratas para partida de motores de automóveis, iluminação e ignição. A partida dos primeiros automóveis a combustão foi feita com baterias de chumbo-ácido.

Como desvantagem para o uso desse tipo de baterias, tem-se a dificuldade de se determinar e manter precisamente o estado de carga. O tempo de vida útil das baterias chumbo-ácido depende da forma como ela é descarregada e da temperatura de operação, o que traz muitos problemas na detecção do estado de carga residual na bateria. Esta dificuldade pode ser contornada a partir do uso de sistemas de monitoração e controle precisos, juntamente com ritmos de cargas e descargas controladas.

Outra desvantagem da bateria de chumbo-ácido em relação às outras tecnologias de baterias é que elas possuem uma menor capacidade de armazenamento de energia.

Para aplicações onde se requer muita energia, como carros de tração, por exemplo, o volume de baterias de chumbo-ácido requerido é muito elevado tornando impraticável o seu emprego.

4.3.4. Níquel-Cádmio

Este tipo de bateria é a preferida em aplicações onde se tem restrição de espaço e requer pouca energia, como por exemplo: celulares, filmadoras, aparelhos eletrodomésticos. Possui maior energia e densidade de potência do que as baterias de chumbo-ácido. Elas são duráveis e possuem um tempo longo de vida útil, e ainda são mais baratas do que as outras baterias a base de níquel.

O longo período de duração dessas baterias é devido ao uso de aço sólido nas placas, que é mais resistente aos agentes químicos que a cercam, e que mantém a sua integridade mecânica e condutividade elétrica inalterada durante toda a vida útil da bateria.

Nas baterias de chumbo-ácido, as placas são constituídas de chumbo que é corroído naturalmente durante as reações químicas, fazendo com que a placa positiva aumente de volume, e diminua sua eficiência com o passar do tempo. Por este razão pode-se encontrar o de bancos de baterias de níquel-cádmio com mais de 20 anos de uso com quase 100% de sua capacidade. O alto preço pago por esse tipo de baterias é compensado pelo elevado tempo de vida útil.

Outra característica desse tipo de bateria é a menor susceptibilidade com relação à variação de temperatura, tendo sua vida útil afetado por condições extremas de temperatura.

4.4. Métodos de Carga

Os métodos de carga podem variar em função do tipo de baterias que se deseja trabalhar e do tipo de carga. O tempo de carga é o fator fundamental para a classificação dos diversos métodos.

Um carregamento eficiente requer sensores de corrente, para evitar que valores de corrente acima do máximo desejável sejam impostos na carga. A temperatura da bateria é outro item que deve monitorada. Alguns métodos de carga possuem seqüências de carga com

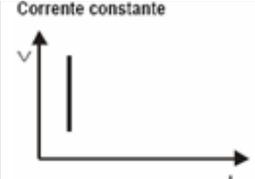
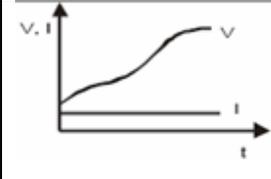
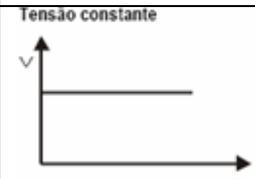
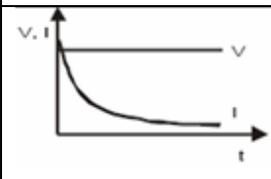
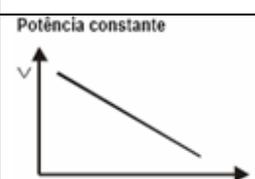
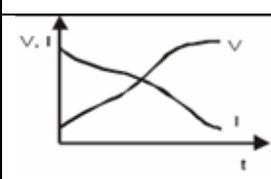
tensões e corrente específicas, exigindo que além da monitoração de tensão e corrente, se tenha uma seqüência de aplicação desses valores em tempos determinados e sobre certas condições da própria bateria sob carga.

Uma vez que a carga encontra-se normalmente ligada à bateria, deve-se ainda medir a tensão de flutuação da mesma, que garantirá que esta mantenha a carga, mesmo fornecendo energia para o sistema o qual está alimentando.

As características de carga podem ainda ser influenciadas por distúrbios externos tais como variação na tensão ou freqüência de carga, ou pela temperatura ambiente. Essas influências podem ser diminuídas através do uso de alguns artifícios eletrônicos.

Os métodos de carga podem ser diferenciados pelas curvas características de corrente e tensão aplicadas na carga e também pelo tempo de carga. Podem-se classificar de uma maneira geral três métodos bem definidos de carga. Esses métodos se caracterizam por corrente constante, tensão constante ou potência constante. A tabela 4.1 apresenta um resumo desta classificação geral desses três métodos.

Tabela 4.1. Características gerais de cargas em baterias.

Característica de carga	Característica de tensão e corrente no tempo	Aplicação
<p>Corrente constante</p> 		<p>Carga parcial Carga Completa Sobrecarga.</p>
<p>Tensão constante</p> 		<p>Permitida por pequenos intervalos de tempo e com o controle de temperatura.</p>
<p>Potência constante</p> 		<p>Permitidas por pequenos intervalos de tempo e limitação de corrente de forma a evitar aquecimento</p>

		da bateria.
--	--	-------------

Conforme a variação das grandezas mostradas nos gráficos da tabela 4.1, obtêm-se métodos distintos de carga para as baterias. Esses métodos mudam conforme a variável que se está controlando.

4.5. Características Elétricas das Baterias

As características elétricas mais relevantes em uma bateria são: a capacidade do fornecimento de corrente, medida em ampères-hora e a tensão nos seus terminais. A variação dessas duas características, conforme o uso é de grande importância na escolha do tipo de bateria mais adequado. Outro fator importante no dimensionamento de baterias é a temperatura de trabalho a que estas vão ser submetidas.

A capacidade de uma bateria diminui quando a temperatura diminui e aumenta para temperaturas acima de 25 °C, porém a sua vida útil é comprometida.

A sensibilidade das baterias à temperatura de trabalho pode ser vista na figura 4.1, onde dois bancos de baterias, um de Níquel-Cádmio e outro de Chumbo-ácido, são submetidos às várias temperaturas de trabalho. Nota-se que a sua vida útil é progressivamente diminuída. É possível observar, também, a maior durabilidade das baterias de Níquel-Cádmio.

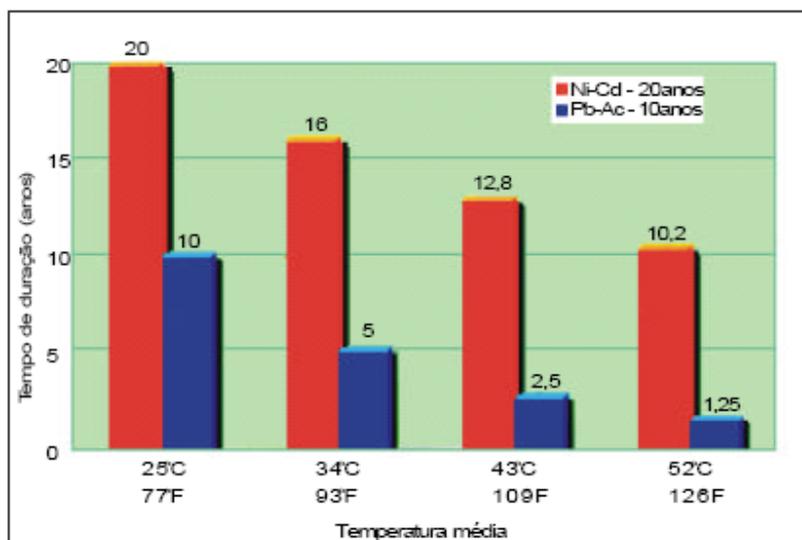


Figura 4.1. Durabilidade das baterias de Ni-Cd e Pb-Ácido em relação à temperatura.

O número de ciclos de carga ou descarga profunda que a bateria pode fornecer é outra característica muito importante no processo de escolha do tipo de bateria. Uma descarga completa consiste na drenagem de toda energia disponível na bateria. Naturalmente a vida útil de uma bateria está diretamente ligada a quão profundamente ela é descarregada cada vez.

Se uma bateria é descarregada pela metade, uma vez por dia, ela irá durar aproximadamente duas vezes mais do que se a descarga fosse feita em 80% de sua capacidade [22]. Se a descarga for de aproximadamente 10%, o tempo de vida útil dela durará pelo menos cinco vezes mais, mas para isso será necessário aumentar a capacidade para um valor muito maior.

As baterias que necessitam ser armazenadas por longos períodos de tempo podem eventualmente perder parte da sua capacidade. Normalmente uma tensão de flutuação deve ser mantida nos terminais de uma bateria para compensar as perdas por auto descarga, mesmo esta não estando em uso.

Normalmente o procedimento inicial para determinar o nível de cargas das baterias consiste na medição da tensão nos seus terminais e da densidade do eletrólito, para verificar se estão situados dentro de uma faixa recomendada pelo fabricante. Mesmo assim este teste não é plenamente confiável sobre a eficiência da bateria, só um ensaio de descarga poderá tirar a dúvida.

Uma bateria plenamente carregada apresenta uma tensão por elemento de 2,12V a 2,15V ou 12,7V a 12,9V por bateria de 12V. A metade da carga, as tensões por elemento serão próximas de 2,03V. Na descarga profunda esta tensão chega a 1,75V

Atualmente está sendo difundido o uso de baterias seladas que não permitem o acesso interno para medição de seus parâmetros. Como vantagem, esse tipo de baterias apresenta a possibilidade de não gerar gases nocivos, tornando possível o seu acomodamento em ambientes refrigerados próximos a pessoas e equipamentos eletrônicos.

4.6. Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico

No projeto de um sistema fotovoltaico o principal objeto é o cálculo do número de módulos para o atendimento de uma determinada solicitação e carga. Normalmente o número

de módulos sempre depende de dois fatores: quanto de eletricidade é exigido e quanto de radiação está disponível.

A potência obtida na saída dos sistemas fotovoltaicos se altera de acordo com a incidência solar ao longo do dia. Por este motivo costuma-se expressar a potência nominal de uma célula em W_p (Watt pico). Uma mesma célula fornece valores diferentes quando se altera a intensidade de radiação que ela recebe. A potência dada em W_p é a potência fornecida por uma célula fotovoltaica com uma radiação constante de 1000 W/m^2 , a uma temperatura de 25° . Por exemplo, uma instalação de $25W_p$ indica uma potência de $25W$ quando existe uma irradiação de $1000W/m^2$ a $25^\circ C$.

Devido à natureza aleatória da incidência solar, é imperativa a utilização conjunta de sistemas de armazenamento de energia, como baterias, para suprir as cargas nos dias nublados ou durante a noite. A incidência solar por volta do meio dia nas regiões em torno do equador, não muda muito ao longo do ano. Por esta razão não existe tanta diferença entre as quatro estações, as quais ficam mais acentuadas para regiões distantes da linha do equador.

Um sistema fotovoltaico para produção de energia elétrica compreende o conjunto de painéis fotovoltaicos e outros equipamentos convencionais, que adequam ou armazenam a energia elétrica para que possa ser utilizada de forma correta em equipamentos consumidores.

O painel fotovoltaico é o item principal do sistema fotovoltaico e é formado de 20 a 40 células solares, normalmente enfileiradas em quatro linhas paralelas, que fornecem corrente contínua de 12 ou 24V e proporcionam valores de potência compreendidos entre 5 e $100W_p$.

Para o correto dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, três informações principais da carga são de importância capital: tensão, corrente e nível de consumo (Potência consumida).

4.6.1. Dimensionamento da Célula fotovoltaica

Para cada equipamento consumidor, a energia a ser gerada pela célula fotovoltaica será calculada por intermédio da potência requerida e do horário de operação de carga, conforme a equação (4.1).

$$CE_{DC} = \sum (P_{DC} \cdot H_{DC}) \quad (4.1)$$

Em que:

- CE_{CC} = Consumo de energia CC (Wh);
- P_{CC} = Potência das cargas CC utilizadas pelo usuário;
- H_{CC} = Total de horas no dia em que as cargas são utilizadas.

O total de energia diária a ser requisitada do sistema fotovoltaico será:

$$CDE = FS \cdot CE_{dc} \quad (4.2)$$

Em que:

- CDE = Consumo diário de energia;
- FS = Fator de segurança para perdas. Este índice representa a perda de energia inerente ao processo de carga e descarga das baterias, bem como perdas na fiação e conexões. Um coeficiente de 1,2 é normalmente utilizado para um projeto preliminar de sistemas fotovoltaicos.

O tipo e o número de módulos e sua configuração são determinados através do estabelecimento da tensão nominal do sistema, da corrente de pico e da potência total.

O método mais difundido para dimensionamento é o do número de dias de armazenamento desejado ou número de dias nublados consecutivos.

Para isso a potência a ser instalada pode ser encontrada de acordo com:

$$PI = \frac{CDE}{NH} \quad (4.3)$$

Em que:

- PI = Potência a ser Instalada pelos Painéis fotovoltaicos (W);
- NH = Número de Horas de Máxima Radiação Solar: tempo equivalente diário que o módulo estará drenando sua máxima corrente a uma irradiação de 1000 W/m².

Definido a potência total a ser instalada de painéis fotovoltaicos, o próximo passo é a consulta dos catálogos dos fabricantes, para escolha de um modelo com características desejadas de tensão e potência.

O número total de painéis pode então ser encontrado, de acordo com a equação (4.4).

$$NTP = \frac{PI}{PE} \quad (4.4)$$

Em que:

- PE = painel escolhido.

A área ocupada pelos painéis é uma informação importante, principalmente em locais que existe restrição de área disponível.

Esta área pode ser encontrada de acordo com:

$$AO = AP \cdot NTP \quad (4.5)$$

Em que:

- AO = Área total a ser ocupada pelos painéis (m²);
- AP = Área ocupada pelo painel escolhido (m²).

4.6.2. Dimensionamento do banco de Baterias

As baterias podem ser dimensionadas a partir do nível de autonomia que se deseja para o sistema, de acordo com:

$$CAB = \frac{CDE \cdot DA}{DB/100} \quad (4.6)$$

Em que:

- CAB = Capacidade de armazenamento ou reserva das baterias (kWh);
- DA = Número de dias sem radiação solar (dias de armazenamento), ou o número de dias de armazenamento desejado;

- DB = Amplitude de descarga das baterias (%). Segundo uma regra comumente admitida, só se pode utilizar aproximadamente um terço da capacidade nominal de uma bateria sem prejudicar demasiadamente a sua vida útil.

É mais prático expressar a capacidade das baterias em Ah, neste caso CAB é dado por:

$$CAB = \frac{CAB \cdot 1000}{V} \quad (4.7)$$

Onde V é a tensão nominal da bateria (Volts).

4.7. Conclusão

A obtenção de energia elétrica pode ser feita diretamente a partir da energia do Sol, através da compreensão do princípio de operação de um painel fotovoltaico e da análise da quantidade e da maneira com que a energia solar chega à superfície da terra.

É possível dimensionar uma célula fotovoltaica, conjugado a um sistema de baterias, de forma que o conjunto alimente uma determinada quantidade de cargas pré-estabelecidas. Para isso o projetista terá que estabelecer a autonomia desejada à partir da importância atribuída às cargas e da disponibilidade de recursos na região.

A célula fotovoltaica e o sistema de baterias pode ser parte integrante de um conjunto destinado a alimentar equipamentos de telecomunicações em comunidades isoladas

5 SISTEMAS DE ENERGIA PARA FONTES DE ALIMENTAÇÃO DE CENTRAIS DE TELECOMUNICAÇÕES EM COMUNIDADES ISOLADAS

5.1. Introdução

Um grande número de comunidades e localidades, na Região Amazônica ainda não dispõe de serviços de telecomunicações e energia elétrica. Esse isolamento é mais acentuado principalmente no Estado do Amazonas, nas regiões próximas das fronteiras.

A problemática da instalação de equipamentos de telecomunicações em comunidades isoladas é pouco explorada, do ponto de vista da telefonia, sendo os estudos nessa área relativamente escassos, principalmente na Região Amazônica.

Este capítulo aborda as características de uma pequena estação telefônica, situada em localidade isolada e propor uma fonte completa de energia, composta de fonte CC e fonte CA, com suas características voltadas para este tipo de aplicação. O capítulo se inicia com um breve histórico de como a telefonia foi implantada e evoluiu no Estado do Amazonas.

5.2. Histórico das Telecomunicações no Estado do Amazonas [23]

A história do telefone no Estado do Amazonas tem início no ano de 1890, quando Joaquim Caribé Rocha é autorizado a instalar linhas telefônicas em Manaus. Essa concessão de serviço público tinha a duração de 25 anos, com exclusividade para o perímetro da cidade e seus arredores. No ano de 1953 são atendidas reclamações sobre o funcionamento dos serviços telefônicos e promove-se a expansão para 2.000 aparelhos, pois só havia 1.750 ligados em Manaus.

Em 1961 a Pará Telephone Company Limited, com sede na Inglaterra, explora sob concessão, os serviços telefônicos de Manaus e Belém. No ano de 1965, no governo de Arthur César Ferreira Reis, é criado o Grupo Executivo de Telecomunicações – GETEL, com o objetivo de determinar as providências necessárias para a criação do sistema de telecomunicações e constituição de uma empresa de economia mista, responsável pela exploração e comercialização dos serviços de telecomunicações.

Em 21 de junho de 1965 é criada a Companhia Amazonense de Telecomunicações – CAMTEL, para operar cerca de 6.000 terminais telefônicos automáticos. Nos seus primeiros anos, a CAMTEL atuou nos municípios de maior importância econômica: Itacoatiara, Parintins, Manacapuru, Coari, Maués, Borba, Manicoré, Boca do Acre e Benjamin Constant, todos dotados de telefonia em rede HF - High Frequency e UHF - Ultra High Frequency.

No ano de 1966, os governos do Amazonas, Pará e os demais da região, em convênio com a Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia - SUDAM promovem a elaboração de um plano para implantação do sistema regional de telecomunicação, assegurando-se, dessa maneira, as comunicações telegráficas, telefônicas e telex, com os grandes centros do Brasil.

Em 1968 são inaugurados, o serviço urbano de Manaus, com 4.189 telefones instalados e o interurbano em quatro municípios do interior. Neste mesmo ano, pelo decreto 63.101, é criado o Grupo Executivo de Telecomunicações para o Amazonas - GETEM. No ano de 1970 é firmado convênio com a Empresa Brasileira de Telecomunicações – EMBRATEL, para as ligações interestadual e internacional, com auxílio da telefonista.

No dia 02 de julho de 1973 nasce a empresa de Telecomunicações do Amazonas S.A. - TELAMAZON e o controle acionário da Companhia Amazonense de Telecomunicações - CAMTEL, passa para a holding Telecomunicações Brasileiras S.A. - TELEBRAS. Já em 1974 a TELAMAZON contava com 639 empregados e 8.550 telefones instalados. Em dezembro de 1988 estava com 904 empregados e 126.302 telefones instalados, entre capital e interior. Com relação aos serviços, havia um total de 2.246 telefones públicos instalados, entre capital e interior.

Em 22/07/1994 a TELAMAZON e a empresa Ericsson Telecomunicações lançaram oficialmente o Serviço Móvel Celular – SMC, no Estado do Amazonas. Na primeira fase, com apenas 5 Estações Rádio Base - ERBs e 2.500 terminais, atendendo o perímetro urbano e alguns pontos turísticos. Em 1997, contando com 890 empregados, a TELAMAZON atende 324 localidades com 151 mil acessos telefônicos convencionais.

No final do ano de 1999, deu-se a privatização de todo o sistema de telefonia fixa do Brasil, com a Telamazon sendo incorporada ao controle da Telamar. Nos últimos anos houve

uma evolução acentuada do número de linhas instaladas, tanto na capital quanto no interior principalmente em função da implantação do PGMU.

No presente, o Estado do Amazonas conta com uma infra-estrutura de telefonia capaz de atender todo o estado com o tráfego de voz e dados em alta velocidade.

5.3. Sistemas de Energia Para Instalações de Telecomunicações

Um sistema de alimentação de potência ininterrupta, para sistemas de telecomunicações em comunidades isoladas, pode ser composto por circuito retificador/carregador de baterias, banco de baterias, circuito inversor de tensão, painéis fotovoltaicos, geração local de energia CA.

Associados ao conjunto, existem alguns sistemas auxiliares tais como o regulador de tensão que faz a interface entre os painéis fotovoltaicos e o banco de baterias, uma unidade de supervisão e controle que faz a supervisão e o monitoramento de todo o sistema e os dois quadros de distribuição de energia: Quadro de Distribuição de Corrente Contínua – QDCC e Quadro de Distribuição de Corrente Alternada - QDCA, de onde é fornecida a alimentação para todos os equipamentos consumidores presentes na estação de telecomunicações.

Todos os equipamentos devem funcionar de forma integrada e sob uma seqüência ou modo de operação. O diagrama da figura 5.1 ilustra um sistema desse tipo. O sistema de supervisão e controle, colocado hierarquicamente acima dos demais equipamentos, tem a função de supervisionar e controlar todo o conjunto, podendo gerar alarme local ou remotamente, para um centro de supervisão local ou distante.

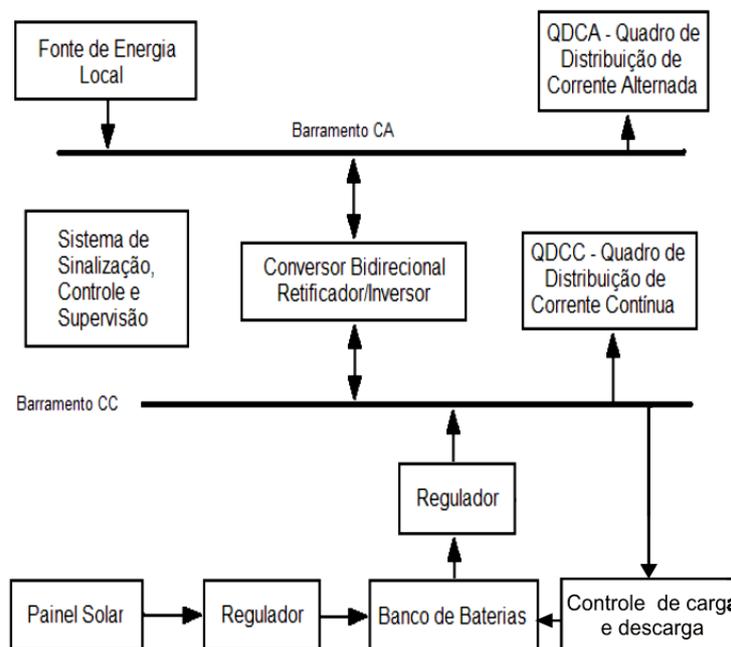


Figura 5.1. Diagrama de blocos de um sistema de energia ininterrupta para telecomunicações.

Conforme se observa pelo diagrama de blocos, o sistema é modular, suas partes constituintes podem funcionar de forma independente, e mesmo com a ocorrência de defeitos em pontos localizados, o sistema pode continuar a funcionar parcialmente. Portanto, pode-se observar algumas características que o sistema deve apresentar:

- Os equipamentos e partes devem ser projetados de forma a serem confiáveis e resistentes, de forma a necessitarem de pouca manutenção;
- Deve haver modularidade, para permitir a substituição de partes, pelo próprio operador, visando também a continuidade de funcionamento dos demais;
- O sistema de supervisão e controle deve ser simples e confiável, para permitir a operação e a manutenção preventiva de forma fácil.

Na seqüência são apresentadas descrições das funções e características de cada módulo presente no diagrama de blocos.

5.4. Retificador [13]

A unidade retificadora é sem sombra de dúvida, uma parte imprescindível de uma fonte de corrente contínua. Comumente denominada de RETIFICADOR, a unidade retificadora –

UR, é uma fonte de tensão contínua que, para os sistemas de telecomunicações, apresenta duas características básicas e importantes:

- Estabilização de tensão;
- Estabilização de corrente.

Nos sistemas de telecomunicações, além de alimentar os consumidores, através do QDCC, alimenta também o conjunto de elementos de bateria que é utilizado para suprir energia aos consumidores nos casos de não funcionamento do retificador. A capacidade do retificador é dimensionada de forma a suprir além dos consumidores, também a bateria.

O retificador pode trabalhar em duas situações distintas, flutuação e carga. As características principais do retificador podem ser resumidas, de acordo com as seguintes informações:

- Tensão de entrada;
- Frequência da tensão de entrada;
- Consumo de potência reativa;
- Tensão de saída;
- Rendimento;
- Presença de harmônicos na corrente de entrada da rede de energia elétrica;
- Corrente de saída.

5.5. Inversor

O inversor é um equipamento que converte a tensão CC na entrada, que é proveniente do barramento de baterias, para fornecer na saída uma tensão CA, na forma senoidal e regulada.

Havendo uma falha na alimentação CA, proveniente da geração local, a unidade de supervisão e controle comanda o acionamento do inversor, conectando-o ao QDCA. Com isso as cargas essenciais, que não podem parar, ficam sendo alimentadas através do inversor, enquanto o sistema se normaliza. As características principais desses equipamentos são listadas a seguir:

- Tensão de entrada;
- Frequência de alimentação;

- Tensão de saída;
- Corrente de saída;
- Rendimento;
- Fator de potência;
- Distorção harmônica.

Também têm-se que, a tensão gerada nos painéis e entregue à bateria é contínua, logo, o sistema deve fazer a inversão para corrente alternada de forma a possibilitar a conexão de duas fontes de energia de natureza diferente (painel fotovoltaico e grupo gerador local), quando necessário.

5.6. Bateria

A função prioritária das baterias num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que se produz nos painéis fotovoltaicos durante as horas de luminosidade a fim de poder ser utilizada à noite, durante períodos prolongados de mau tempo ou quando existir falta de geração local.

Outra importante função das baterias é prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar. É o caso do instante de ligamentos das cargas que pode exigir uma corrente superior à nominal, durante uns poucos segundos. Normalmente o banco de baterias de acumuladores e os módulos fotovoltaicos trabalham em conjunto para alimentar as cargas. Durante a noite ou quando a geração local estiver desligada ou mesmo com algum defeito, toda a energia pedida pela carga é fornecida pelo banco de baterias.

Em horas matutinas os módulos começam a gerar, mas se a corrente que fornecem for menor que aquela que a carga exige, a bateria deverá contribuir. À partir de uma determinada hora da manhã a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos supera a energia média procurada, passando então a recarregar as baterias.

Utilizam-se principalmente baterias de 12V/150Ah. Recomenda-se o uso de baterias seladas de ciclo constantes, livres de manutenção. Baterias não devem ser instaladas diretamente sobre o solo ou piso, devem sempre ser assentadas sobre uma base plástica ou de madeira. Observar que o local esteja sempre livre de umidade e impurezas, e seja ventilado. A

eficiência do sistema de energia solar depende diretamente da qualidade e do estado das baterias. Baterias velhas aceitam menos carga e ainda desperdiçam a energia de carga fornecida pelas células fotovoltaicas.

A capacidade de armazenagem de energia de uma bateria depende da velocidade de descarga e das cargas a alimentar. A capacidade nominal que a caracteriza corresponde de uma maneira geral ao tempo de autonomia estabelecido. Quanto maior for o tempo de descarga, maior será a quantidade de energia que a bateria fornece.

5.7. Painel Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico relatado por Edmond Becquerel em 1839, parte do princípio do aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Apenas em 1956 deu-se início à produção industrial de módulos fotovoltaicos, acompanhando a era da microeletrônica.

Um dos setores que incrementou o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica foi o segmento de telecomunicações, sendo utilizada como fonte de energia para a alimentação de estações localizadas em lugares remotos ou não supridas por energia comercial. Outro agente impulsionador da conversão fotovoltaica foi o setor espacial para o suprimento energético de satélites. O efeito fotovoltaico é ilustrado na figura 5.2, onde é possível observar que sua estrutura é semelhante a um diodo semicondutor.

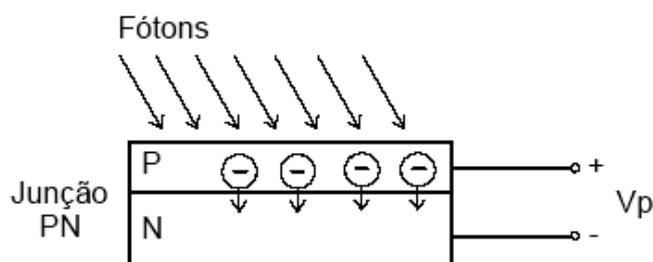


Figura 5. 2. Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica.

O módulo fotovoltaico é a unidade básica comercialmente disponível, proporcionando proteção mecânica e ambiental às células e permitindo a sua utilização exposta às intempéries. O módulo é composto de células encapsuladas e conectadas eletricamente em série e/ou em paralelo, produzindo níveis de tensão e corrente adequados à utilização. Os módulos

fotovoltaicos podem, por sua vez, ser também conectados arbitrariamente em série e paralelo, de forma a compor painéis fotovoltaicos capazes de fornecer os níveis de tensão e corrente (potência) necessárias à determinada aplicação.

A característica de saída de um painel fotovoltaico pode ser observada na figura 5.3, que fornece a corrente de saída em função da tensão de saída, para um determinado nível de insolação, com temperatura constante.

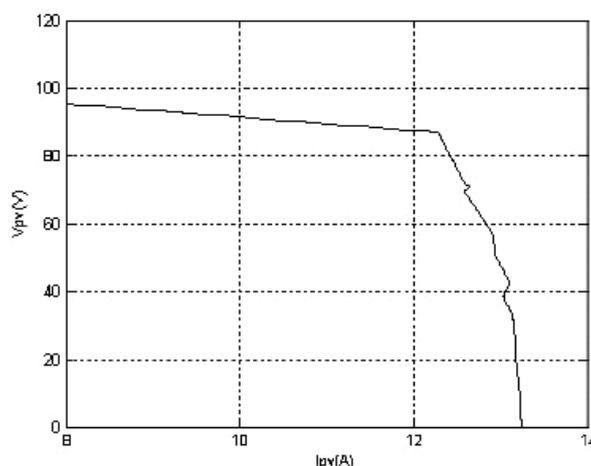


Figura 5.3. Característica de saída tensão x corrente de um painel fotovoltaico típico para um valor de radiação solar, com temperatura constante [24].

Para compor um painel fotovoltaico são associadas várias células de forma a se obter as tensões e correntes desejadas. Os painéis fotovoltaicos podem ser encontrados comercialmente com tensões entre 12V e 68V, correntes de 0,5A a 8A e potenciais de 3W a 110W.

5.8. Quadro de Distribuição de Corrente Alternada – QDCA

Nos sistemas de energia onde existem as duas fontes CC e CA, a distribuição de tensão alternada para os retificadores, equipamentos, iluminação e exaustores da estação telefônica e demais equipamentos é feito pelo QDCA. Esta é a sua finalidade básica. Deste equipamento saem circuitos, através de disjuntores, para alimentações dos diversos equipamentos da estação que funcionam em CA.

O QDCA se localiza normalmente na mesma dependência do sistema retificador e se constitui em gabinete com as partes internas acessíveis por uma porta frontal.

Externamente, o QDCA apresenta os medidores de tensão e corrente e as alavancas dos disjuntores. Comumente encontra-se uma sinalização luminosa para a indicação de tensão e corrente nos barramentos do QDCA.

Nos sistemas de energia as principais informações, como por exemplo, tensão e corrente no QDCA, serão monitoradas em tempo real, pelo bloco de sinalização e controle.

5.9. Quadro de Distribuição de Corrente Contínua – QDCC

O QDCC é usado com a finalidade de permitir alimentação, em CC, independente para cada um dos bastidores dos diversos equipamentos que operam em CC dentro da estação de telecomunicações. Da mesma forma que para os distribuidores de CA, o distribuidor de CC efetua a alimentação dos vários bastidores a partir de um barramento de entrada.

As tensões usadas para alimentação de equipamentos de telecomunicações estão padronizadas, no Brasil, em 12V, 24V e 48V. A localização do QDCC é sempre mais próxima possível dos equipamentos a que se quer alimentar.

Este posicionamento visa diminuir a queda de tensão na cabeação de alimentação, pelo encurtamento das distâncias. Normalmente, o QDCC é instalado na mesma sala dos equipamentos de telecomunicações.

O QDCC é na realidade um quadro de distribuição de corrente contínua para toda a estação. Isto evita a profusão de cabos, no interior da estação de telecomunicações, se este não estivesse presente.

5.10. Regulador

Este dispositivo faz a interface entre os painéis fotovoltaicos e os demais equipamentos de energia. Tem como função principal, regular os níveis de tensão, gerado pelos painéis fotovoltaicos, a níveis compatíveis ao barramento CC.

Conjuntamente a saída do retificador, a saída da bateria e a entrada do inversor estão interligados no mesmo barramento. Se o regulador não atuar corretamente, pode haver curto-circuito no barramento, devido à diferença de tensão entre esses equipamentos.

O diagrama da figura 5.4 ilustra as funções desempenhadas pelo regulador na adequação dos níveis de tensão gerado pelos painéis fotovoltaicos ao restante do sistema.

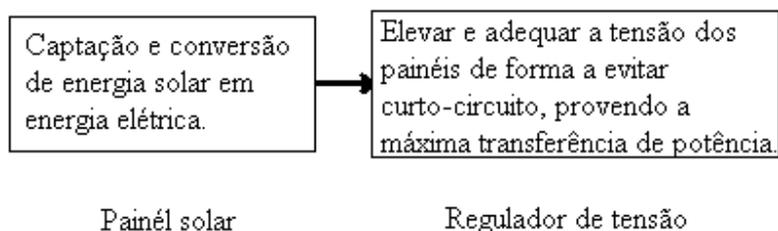


Figura 5.4. Atuação do regulador de tensão.

Para que se possa interligar os painéis fotovoltaicos aos equipamentos da pequena estação de telecomunicações em comunidades isoladas, deve-se obedecer a certos níveis de tensão, para que esta energia entregue ao sistema tenha boa qualidade e que o sistema ofereça confiabilidade e segurança.

Assim o sistema deve oferecer:

- Isolação galvânica entre os painéis e a rede elétrica, evitando assim riscos de choques elétricos e fugas de corrente gerando perdas de energia.
- A corrente fornecida, ou injetada no sistema deve ter um baixo conteúdo harmônico, de forma a não introduzir harmônicas que causem interferências nas cargas conectadas e prejudique a qualidade da energia elétrica.

O regulador de carga pode otimizar o uso da energia fotovoltaica, protegendo a bateria contra sobrecargas e descargas excessivas, não permitindo a descarga total da bateria, garantindo maior vida útil à bateria e protegendo os módulos fotovoltaicos evitando o retorno da energia.

5.11. Unidade de Supervisão e Controle

Toda a parte de controle e sinalização tanto local como remota, envolve a atuação da unidade de sinalização e controle. Os eventos que acontecem nos equipamentos e nas cargas devem ser devidamente monitorados e as informações coletadas são processadas e analisadas, para o perfeito funcionamento dos equipamentos.

A partir de um determinado evento, o bloco de controle e sinalização pode gerar comandos de forma a atuar preventivamente ou corretivamente em determinado equipamento. Outros eventos podem gerar apenas sinalização local ou remota para o operador.

Esta unidade é especialmente importante no comando de acionamento, quando for necessária a geração local de energia CA. Neste equipamento podem ser instalados os diversos instrumentos de medição de corrente e tensão, necessários para informar aos operadores, a situação em tempo real do funcionamento do sistema.

O controle operacional dos equipamentos de energia das estações pode ser feito por um centro distante ou localmente, por intermédio de telecomandos e indicações visuais em um painel de supervisão e controle.

Estas indicações traduzem os sinais elétricos indicativos da condição de funcionamento ou o estado em que se encontra cada equipamento do sistema de energia e sistemas auxiliares da estação de telecomunicações. Normalmente o painel de supervisão, por onde são feitas as indicações sobre o sistema de energia e executados os telecomandos, encerra também sinalizações referentes ao sistema rádio da estação.

A unidade de supervisão e controle pode monitorar os eventos mais relevantes de toda a estação, processando as informações e gerando comandos que podem ser simples informações ou ações corretivas, visando o funcionamento dos equipamentos com segurança e confiabilidade, bem como a segurança das pessoas e das instalações.

5.12. Funcionamento de Fontes de Energia Ininterrupta com Geração Simultânea para Telecomunicações em Comunidades Isoladas

Para facilitar o entendimento do funcionamento e da atuação de cada equipamento em todo o conjunto, são definidas quatro combinações diferentes de disponibilidades das duas fontes de energia presente: painéis fotovoltaicos e geração local de energia CA para o acionamento dos equipamentos.

É necessário esclarecer que no Brasil já existe legislação que estabelece os requisitos necessários à obtenção de registro e autorização para a implantação de centrais geradoras de energia elétrica alternativa, elaborada pela Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

[25]. Essa legislação prevê, inclusive, a possibilidade da venda dessa energia para a concessionária local de distribuição de energia, como já ocorre em alguns lugares do país, notadamente nos estados da Região Sul.

Assim que a energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos faltar por um motivo qualquer, seja ele acidental ou proposital, o sistema de geração simultânea deve acionar, imediatamente, a geração CA local.

A figura 5.5 apresenta a idéia básica dos sistemas de geração simultânea a partir de painéis fotovoltaicos combinado com sistemas de geração local de energia CA.

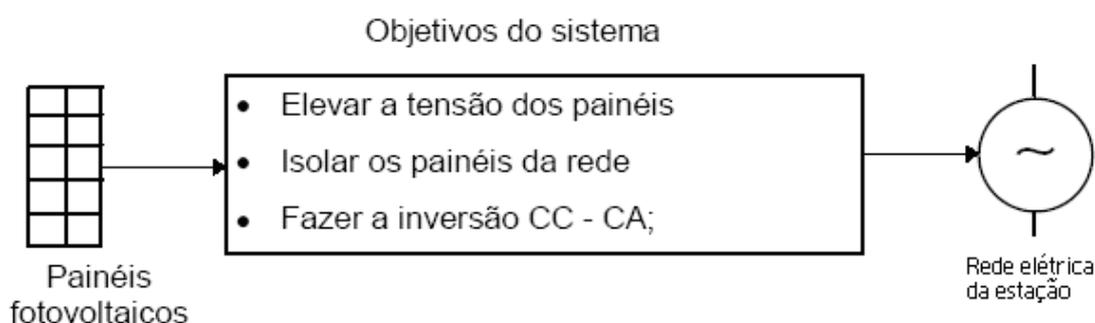


Figura 5.5. Sistema de geração simultânea com painel fotovoltaico.

5.12.1. Geração CA Local Presente e Painéis Solares Ativos

Este tipo de situação compreende a alimentação CA, proveniente de alguma fonte local presente alimentando o QDCA e por conseqüência alimentando o retificador. Do outro lado tem-se a energia solar sendo captado pelos painéis fotovoltaicos no período diurno e sendo convertido em eletricidade de onde será alimentado o barramento CC.

Parte dessa energia que não é utilizada, no momento, é armazenada nas baterias na forma de energia química de onde poderá ser utilizada mais tarde.

Nessa situação o retificador funciona normalmente, convertendo tensão CA em tensão CC, alimentando o barramento que é ligado ao QDCC. Como foi visto, a partir desse quadro, são ligados todas as cargas que consomem energia CC. O sistema de controle e sinalização permanece supervisionando, em tempo real, as principais informações de corrente e tensão no sistema.

5.12.2. Geração CA Local Ausente e Painéis Solares Ativos

Nesta situação o sistema opera dentro da normalidade haja vista que os painéis solares e a bateria são dimensionados de forma a abastecer as cargas em situações normais, não havendo necessidade de geração de energia alternativa local neste instante, economizando recursos energéticos para situações de grande solicitação de carga.

Outra situação em que esse estado pode ocorrer é por algum tipo de impedimento da geração CA local, como por exemplo, um defeito de equipamento, tem-se assim fonte de energia CA local inoperante.

Neste caso o sistema de painéis fotovoltaicos continua a operar normalmente, se for dia, creditando energia ao sistema e alimentando os diversos consumidores atendidos pelos dois quadros de distribuição: QDCA e QDCC. Aqui o QDCA é alimentado através do inversor de tensão e o QDCC através da saída da bateria, por intermédio do regulador de tensão.

Eventualmente se houver sobras de energia, esta é armazenada na bateria ou se a energia demandada no momento for um pouco mais elevada, a bateria passa a entregar a energia acumulada quimicamente em seus vasos de forma a manter a tensão nos níveis desejados.

5.12.3. Geração CA Local Ausente e Painéis Solares Inativos

As duas fontes de energia local, a geração CA e os painéis solares estão inoperantes. Esta condição pode ocorrer se for noite, por exemplo, ou por defeito dos equipamentos.

Neste caso, as cargas de CC permanecem sendo alimentadas normalmente pela bateria que é ligada ao barramento CC. Um circuito de supervisão analisa em tempo real o nível de tensão CC de forma que a tensão da bateria não sofra uma descarga profunda, ocasionando uma diminuição da sua vida útil. Portanto a partir de um nível de segurança o sistema de supervisão e controle comanda o desligamento da bateria.

Ainda nessa situação, a alimentação do QDCA é fornecida através do inversor, que neste momento é alimentado pelo sistema de bateria. O inversor é comandado a entrar em funcionamento e assume as cargas essenciais, que não podem parar.

O inversor converte a tensão CC presente no barramento CC, em CA, fornecendo tensão senoidal com baixo conteúdo harmônico necessário a alimentação dos equipamentos presentes na estação de telecomunicações.

5.12.4. Geração CA Local Presente e Painéis Solares Inativos

Esta condição é uma variação da primeira condição, onde ocorre uma grande solicitação de carga, quando os painéis fotovoltaicos estão inativos, por exemplo, à noite. Neste caso, o QDCA é alimentado normalmente, conectando-o diretamente a geração de energia local, enquanto que o conjunto bateria e retificador alimentam o QDCC. Nesta situação o sistema de supervisão detecta a solicitação de carga elevada e comanda a geração CA local.

5.13. Sistema de Geração Simultânea Proposto

Um sistema de geração simultânea de energia para alimentação de sistemas de telecomunicações em comunidades isoladas é proposto em [26] é ilustrado na figura 5.6. É composto por conversor bidirecional, banco de baterias, conversor *boost* e célula fotovoltaica convenientemente interligados de forma a proporcionar alimentação aos equipamentos de telecomunicações em qualquer situação possível de disponibilidade de geração de energia local.

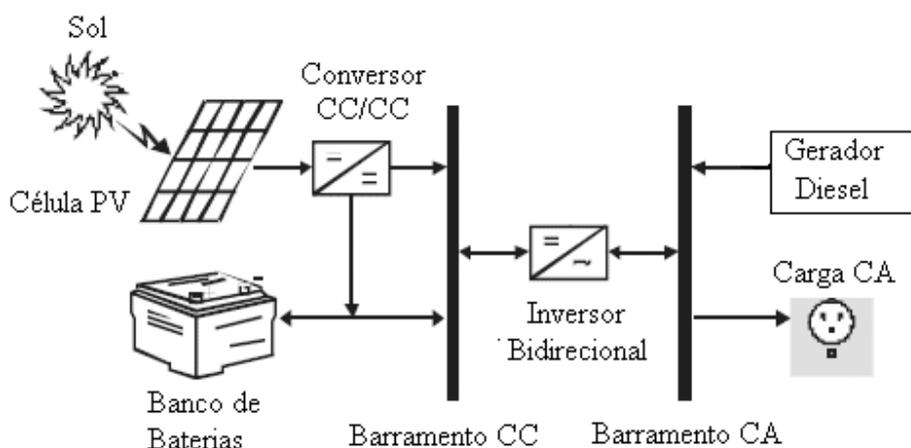


Figura 5.6. Conexões no sistema de geração proposto em [26].

O sistema proposto deve ser robusto e confiável, requerendo pouca manutenção, atendendo um conjunto de requisitos assim definidos:

- Comutação suave sobre os interruptores;
- Circuito de controle único;
- Operação com frequência constante;
- Simplicidade e robustez.

Uma alternativa ao conjunto proposto na figura 5.6, é ilustrado na figura 5.7, onde um segundo conversor *boost* foi acrescentado de forma a fazer a compensação das perdas de tensão, oriunda do descarregamento das baterias, quando da solicitação de corrente. Neste caso, o barramento CC terá sempre uma tensão regulada em 48V, até o limite de segurança estabelecido pelo sistema de supervisão e controle, para alimentação dos equipamentos.

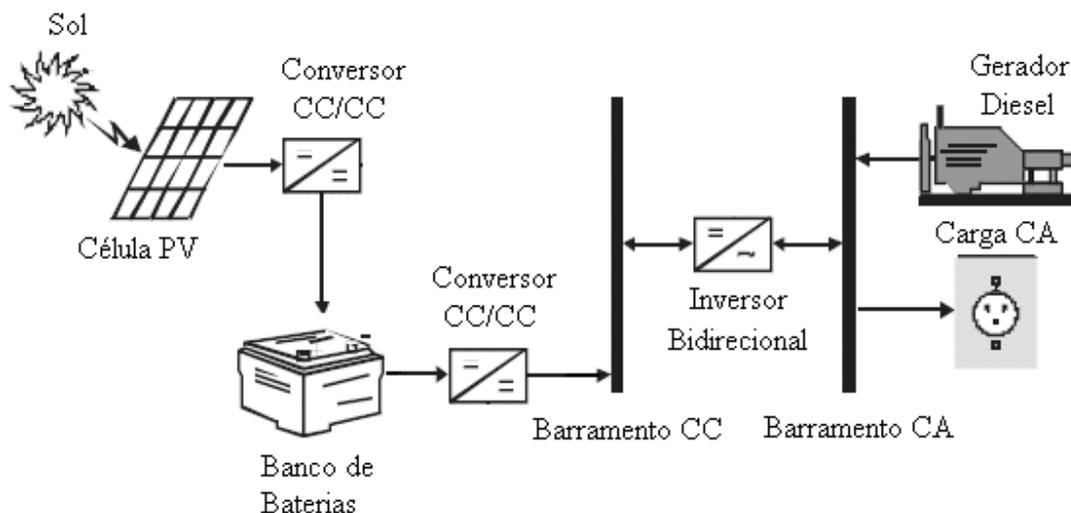


Figura 5.7. Conexões no sistema de geração proposto neste trabalho.

O conjunto é dividido em estágios de potência, um controle digital e outro analógico destinado a comandar os disparos da ponte de tiristores e dos conversores *boost*. Esta solução é uma evolução do conjunto proposto na figura 5.6 e é a que foi implementada e testada em laboratório.

Na seqüência tem-se a descrição dos conversores componentes do sistema, com suas principais funções. O arranjo é composto dos seguintes itens:

- Conversor Bidirecional: Responsável pelo fluxo de potencia nos dois sentidos, da fonte para a carga e da carga para a fonte. Por essa característica pode funcionar como retificador ou inversor dependendo da disponibilidade de potência nos barramentos CC e CA;
- Conversores CC CC: Estes conversores atuam como interface entre a célula fotovoltaica e o banco de baterias e entre este e o barramento CC, para adequar o nível de tensão da saída para a entrada e promover a estabilização na tensão de saída;

- Gerador PV: Formado a partir dos painéis solares, é a parte mais importante do sistema de geração simultânea;
- Sistema de baterias: A bateria funciona para acumular energia, gerada pelo sistema de geração simultânea e eventualmente não usada, podendo ser armazenada para posterior utilização.

5.14. Escolha das Estruturas

O diagrama em blocos, ilustrado na figura 5.1, representa os componentes necessários para compor a fonte de alimentação de energia para sistemas de telecomunicação em comunidades isoladas. Feita a escolha em termos de conversores, a sugestão do presente trabalho é a que é ilustrada na figura 5.8.

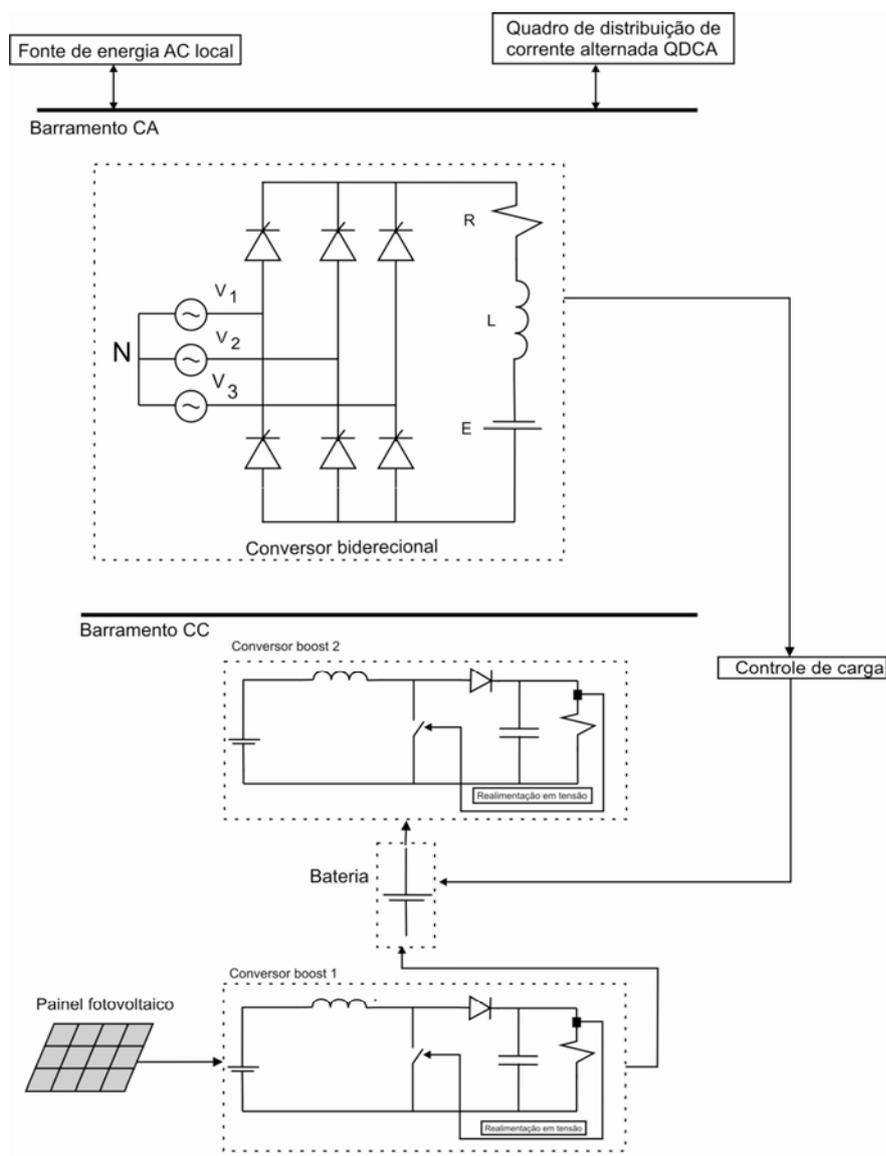


Figura 5.8. Diagrama em blocos da estrutura básica.

A estrutura ponte completa trifásica totalmente controlada a tiristores, é um conversor bidirecional que pode operar nos dois quadrantes, portanto este pode realizar as etapas de retificação e inversão, além do que é bastante confiável, pois utiliza a tecnologia de tiristores, já consagrada em diversas aplicações e que permite a operação em amplas faixas de valores de tensão, corrente e frequência.

Portanto a escolha desse conversor permitirá a economia de uma estrutura, na execução do projeto da fonte de telecomunicação para comunidades isoladas estudadas até o presente.

O sistema atua de forma integrada de forma a fornecer alimentação para as cargas por caminhos alternativos, mantendo com isso a segurança necessária ao bom funcionamento da pequena estação de telecomunicação em comunidade isolada, utilizando os recursos locais para a geração de energia elétrica. Segue a descrição da função de cada bloco, dentro do diagrama.

Conversor *Boost* 1: Situado entre a célula fotovoltaica e o banco de baterias, tem a função de regular a tensão de saída da célula fotovoltaica, que é de 24V nominais, em 48V para ser conectada aos terminais da bateria.

Conversor *Boost* 2: Situado entre o banco de baterias e o barramento CC, onde estão ligadas as cargas, tem a função de regular a tensão de saída das baterias em 48V nominais. No processo de descarga, ocorre uma diminuição progressiva no valor de tensão. Este conversor atua no sentido de complementar esta tensão para que ela permaneça sempre em 48V.

Célula Fotovoltaica: Este bloco destina-se a captar energia solar e convertê-la em energia elétrica, que depois de regulada pelo conversor *boost*, será armazenada no conjunto de baterias.

Banco de Baterias: Destina-se a armazenar a energia fornecida pelo sistema e alimentar os equipamentos consumidores. Também cumpre a função de filtro.

Grupo Motor Gerador: Tem a função de gerar energia CA que alimentará o carregador de baterias.

Carregador de Baterias: Quando ocorrem descargas profundas é acionado com a finalidade de fazer a recarga das baterias.

Conversor Bidirecional: É formada por uma ponte trifásica totalmente controlada a tiristores, que pode funcionar como retificador ou inversor, dependendo do ângulo de disparo a que for submetido. Pode a partir do barramento CC, inverter a tensão e fornecer tensão alternada para o barramento CA. Do outro modo pode a partir da tensão alternada presente no barramento CA, atuar como retificador e entregar ao barramento CC, uma tensão de nível CC.

5.15. Conclusão

Uma fonte de energia para alimentação de um sistema de telecomunicações para comunidades isoladas, para atender aos equipamentos normalmente presentes nesta estação, deve ser composta basicamente por: retificador, geração local, sistema de baterias, célula fotovoltaica, reguladores e os quadros de distribuição de energia CA e CC.

O conjunto dos equipamentos de energia para telecomunicação em comunidades isoladas pode operar a partir de qualquer situação de disponibilidade de energia presente na localidade, conjugado com a uma célula fotovoltaica e prover alimentação ininterrupta para todos os equipamentos presentes na estação de telecomunicações.

Além do que esta composição permite total versatilidade, pois permite ainda que por qualquer defeito de um determinado equipamento, o restante da fonte permaneça funcionando normalmente.

6 PROJETO E SIMULAÇÃO DE CONVERSORES

6.1. Introdução

A simulação é um passo importante no projeto dos conversores de energia, pois permite fazer as comparações devidas com os dados obtidos via experimentação. Além disso, eventuais ajustes no projeto podem ser feitos antes mesmo antes da construção das estruturas permitindo economia de tempo e recursos.

As etapas de dimensionamento e simulação serão os tópicos abordados nesse capítulo. Serão dimensionados: o banco de baterias, os módulos fotovoltaicos e os conversores de potência. Nos conversores abordados serão dimensionados os elementos do circuito de potência, incluindo os elementos magnéticos.

Para cada conversor serão apresentados os projetos dos circuitos de potência e os resultados das simulações efetuadas, com o software Pspice, com os comentários mais relevantes, visando sua comparação com os resultados experimentais obtidos através da montagem feita em laboratório.

6.2. Definição dos Parâmetros Nominais do Projeto

O sistema de geração simultânea de energia destina-se a satisfazer as necessidades de carga de uma instalação de telecomunicações, em localidade isolada, tendo como cargas uma pequena central telefônica e um transmissor ou receptor via satélite, funcionando de forma ininterrupta, com suas características dadas de acordo com os dados contidos na tabela 6.1.

Tabela 6.1. Características gerais de carga da estação telefônica.

DADOS OPERACIONAIS						
Faixa de tensão (V)	Tensão nominal (V)	Autonomia do sistema (h)	Faixa de temperatura (°C)	Atendimento da estação	Regime de consumo	
38,4 a 48	48	120	20 - 35	Não assistida	Constante	
QUADRO DE CARGA						
Equipamento			Potência total (W)	Corrente (A)	Tempo de uso (h)	Ampere.hora (Ah)

Central Telefônica	91	1,98	24,00	47,52
Transmissor / Receptor Satélite	100	2,00	24,00	48,00
TOTAL	191	3,98		95,52

Pela análise da tabela 6.1, observa-se que a carga da estação é composta de dois pequenos equipamentos, totalizando 191W de potência e alimentados em 48V. Permite-se que a tensão mínima das baterias seja de 80% do valor nominal (dado de projeto). Portanto a faixa de alimentação situa-se entre 48V e 38,4V.

No projeto optou-se por uma autonomia longa de 5 dias (120 horas), que corresponde a um período extremo de não operacionalidade da célula fotovoltaica (por exemplo, vários dias seguidos sem insolação adequada ou mesmo defeito dos equipamentos).

Uma justificativa para escolha dessa autonomia, em principio elevada, é o fato de que a estação é não assistida, ou seja, não tem operador (não seria econômico colocar um operador em uma estação desse porte).

Os conversores serão dimensionados para fornecer na saída um nível de potência compatível com as cargas, mais uma margem de segurança estabelecida.

A figura 6.1 ilustra um diagrama simplificado do fluxo de potência entre os conversores da fonte de energia proposta, a partir do barramento CC.

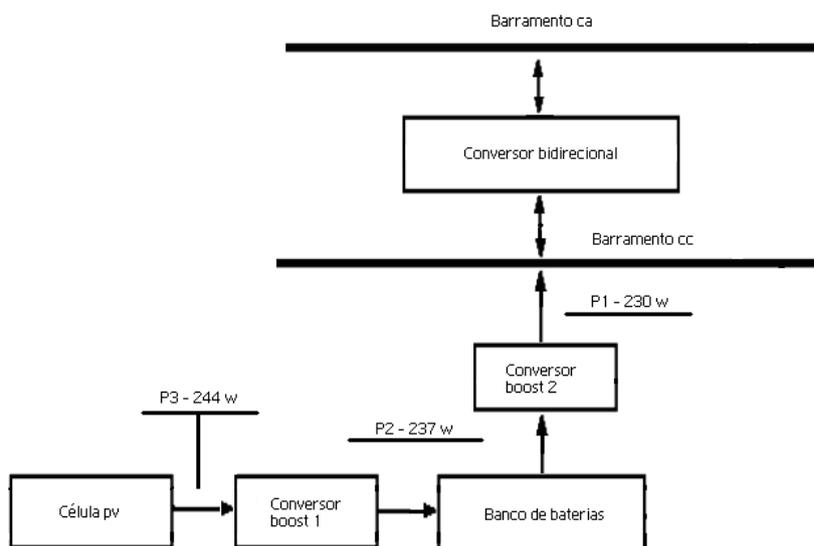


Figura 6.1. Fluxo de potência entre os conversores.

Na tabela 6.1 a potência total dos dois equipamentos é de 191W. Para efeito de dimensionamento considera-se uma margem de segurança de 20% deste valor. Ou seja, a potência de partida para o dimensionamento dos conversores, P1 é de 230W (o valor foi aproximado).

Os dois conversores *boost* têm uma eficiência estabelecida de 97%. Portando a potência na entrada do conversor *boost* 2, P2 é de 237W (230W mais a perda de 3% introduzida pelo conversor *boost* 2). O conversor *boost* 1 introduz uma perda na potência semelhante ao *boost* 2, então de uma potência de 237W na sua saída, a potência na sua entrada é de 244W, que corresponde ao ponto P3.

6.3. Roteiros de Projetos e Dimensionamentos

Neste item será feito o dimensionamento das estruturas utilizadas no presente trabalho. Também serão deduzidas as equações de funcionamento do conversor *boost*.

6.3.1 Dimensionamento da Célula Fotovoltaica

Como foi mencionado, o sistema fotovoltaico destina-se a satisfazer as necessidades de carga de uma pequena instalação de telecomunicações em localidades isoladas (tabela 6.1).

O sistema fotovoltaico consistirá de módulos (40 – 100 Wp) que geram corrente elétrica em CC e é armazenada em baterias estacionárias (50-150 Ah), que são os tamanhos disponibilizados comercialmente.

A energia a ser gerada pelos painéis fotovoltaicos será estimada através da potência exigida e do período de operação de carga (24 horas), conforme a equação (4.1).

Levando as informações da tabela 6.1, nesta expressão, têm-se:

$$CE_{dc} = 91 \cdot 24 + 100 \cdot 24 = 4583,4Wh \quad (6.1)$$

Agora, o total de energia diário a ser solicitada da célula fotovoltaica, levando-se em consideração as perdas da fiação, conexões e relativas ao processo de carga e descarga das baterias, pode ser encontrado através da aplicação da equação (4.2):

$$CDE_{DC} = 1,2 \cdot 4583,4 = 5500,08Wh \quad (6.2)$$

Onde foi atribuído o valor de 1,2 para o fator de segurança F_s .

A potência a ser instalada pode ser encontrada através da equação (4.3), considerando uma média diária de 5h de máxima insolação solar (painéis fotovoltaicos operantes), que é o valor normalmente utilizado para regiões próximas do equador.

$$PI = \frac{5500,08}{5} = 1100,02Wh \quad (6.3)$$

Definido a potência total a ser instalada de painéis fotovoltaicos e a tensão nominal, o próximo passo é a consulta dos catálogos dos fabricantes, para escolha de um modelo com características desejadas de tensão e potência.

Consultando os catálogos comerciais disponíveis, encontra-se um modelo típico com saída nominal de 24V e potência de 160W.

Agora o número total de painéis pode então ser encontrado, de acordo com a equação (4.4) e utilizando o valor de 160, para a potência escolhida PE:

$$NTP = \frac{1100,02}{160} = 6,9 \quad (6.4)$$

Aproximando-se o valor para 7, têm-se então o número de módulos necessários, para compor a célula fotovoltaica.

6.3.2. Projeto do Estágio de Potência de um Pré-Regulador *Boost*

Como o conversor *Boost* foi o escolhido para ser empregado na estrutura da fonte de energia para comunidades isoladas, neste item serão deduzidas as equações necessárias ao dimensionamento dos elementos de circuito, com ênfase para as partes magnéticas.

Considerando o conversor ideal, têm-se que a potência de entrada é igual à potência de saída. A energia cedida pela fonte E é igual à energia recebida na saída do conversor. Conforme os diagramas das figuras 4.1 e 4.3, pode-se escrever que:

$$W_1 = V_i \cdot I_L \cdot T = V_i \cdot I_L \cdot (T_f + T_a) \quad (6.5)$$

A energia recebida pela carga é dada, de acordo com a figura 4.2, por:

$$W_2 = V_o \cdot I_L \cdot T_a = V_o \cdot I_L \cdot (T - T_f) \quad (6.6)$$

Considerando a conservação da energia, pode-se escrever:

$$W_1 = W_2 \quad (6.7)$$

$$V_I \cdot I_L \cdot T = V_0 \cdot I_L \cdot (T - T_f) \quad (6.8)$$

Assim:

$$V_0 = \frac{V_I \cdot T}{T - T_f} \quad (6.9)$$

Por definição a razão cíclica é dada pela expressão:

$$D = \frac{T_f}{T} \quad (6.10)$$

Substituindo-se a equação (6.10) na equação (6.9), obtém-se:

$$V_0 = V_I \cdot \frac{1}{(1 - D)} \quad (6.11)$$

A equação (6.11) relaciona o valor da razão cíclica de um conversor *boost*, em função das tensões de entrada e saída. A razão cíclica, que também é conhecida como ciclo de trabalho, é um parâmetro importante, pois define a tensão de saída do conversor, como uma função da frequência de chaveamento a que está submetido o indutor *boost*. O ciclo de trabalho informa a percentagem de tempo no período, em que indutor é carregado.

O valor de D pode variar teoricamente de zero a um. Desta forma D pode ser representada graficamente como na figura 6.2.

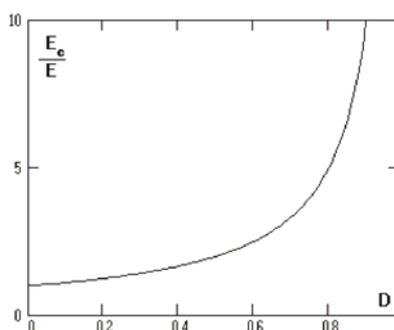


Figura 6.2. **Função de transferência do conversor *boost*.**

Na seqüência têm-se os passos para o dimensionamento dos principais componentes da parte de potência do conversor *boost*:

(a) Dimensionamento do Filtro de Entrada - Indutor

O valor do indutor é calculado em função da ondulação da corrente de entrada. A partir das formas de onda, contidas na figura 4.4, é possível obter a equação da variação de corrente sobre o indutor, no período correspondente a sua carga.

$$\Delta I = \frac{V_0}{L} \cdot T_f = \frac{V_0 \cdot T}{L} \cdot \frac{T_f}{T} \quad (6.12)$$

Desse modo, pode-se escrever:

$$\Delta I = \frac{V_0 \cdot T}{L} \cdot D = \frac{V_0}{f \cdot L} \cdot D \quad (6.13)$$

Definindo-se a ondulação de corrente (ΔI_{I_B}), desejada no projeto do conversor, obtém-se então a respectiva indutância de filtragem, ou seja:

$$L = \frac{V_0}{f \cdot \Delta I_{I_B}} \cdot D \quad (6.14)$$

Onde V_0 é a tensão de saída do conversor, D é o ciclo de trabalho, f é a frequência de chaveamento e ΔI_{I_B} é a máxima variação de corrente tolerada na entrada do conversor *boost*.

A máxima corrente de entrada do conversor pode ser encontrada através da aplicação da equação (6.15):

$$I_{IN_MAX} = \frac{P_0}{\eta \cdot V_{IN_MIN}} \quad (6.15)$$

A máxima variação da corrente de entrada pode ser calculada então, de acordo com a equação (6.16):

$$\Delta I_{LB} = \Delta I_1 \cdot I_{IN_MAX} \quad (6.16)$$

(b) Dimensionamento do Filtro de Saída - Capacitor

Segue o mesmo procedimento apresentado para o filtro de entrada, neste caso o interesse reside em se manter a ondulação de saída ΔV_C dentro de limites pré-estabelecidos pelo projeto do conversor.

Durante o intervalo de tempo $\Delta t = T_F$ (fechamento da chave), o capacitor C alimenta a carga com corrente constante igual a I_0 (supondo uma constante de tempo RC suficientemente grande).

Dessa forma pode-se escrever a corrente fornecida do capacitor para a carga como:

$$i_c = C \cdot \frac{dv_c}{dt} \quad (6.17)$$

Como i_c é a corrente de carga neste intervalo, é supondo que esta corrente é linear dentro deste mesmo intervalo, pode-se escrever:

$$i_0 = C \cdot \frac{\Delta v_c}{\Delta t} \quad (6.18)$$

Substituindo Δt por T_F (intervalo de condução da chave e, portanto o intervalo em que o capacitor alimenta a carga) e multiplicando e dividindo a expressão anterior por T (período), temos:

$$\Delta V_C = \frac{I_0 \cdot T}{C} \cdot \frac{T_F}{T} \quad (6.19)$$

Ou ainda substituindo $\frac{T_F}{T}$ por D e T por $\frac{1}{f}$, temos:

$$\Delta V_C = \Delta V_0 = \frac{D \cdot I_0}{f \cdot C} \quad (6.20)$$

Isolando o valor de D da equação (6.11) e substituindo na equação (6.20), pode-se reescrevê-la como:

$$\Delta V_C = \Delta V_0 = \frac{I_0}{f \cdot C} \cdot \frac{(V_0 - V_I)}{V_o} \quad (6.21)$$

Portanto a partir da equação (6.21) é possível determinar o valor de C dentro de valores pré-estabelecidos de ΔV_0 (variação de tensão permitida na saída do conversor):

$$C = \frac{I_0}{f \cdot \Delta V_C} \cdot \frac{(V_0 - V_I)}{V_o} \quad (6.22)$$

A corrente nominal de saída I_0 pode ser encontrada de acordo com a equação (6.23):

$$I_0 = \frac{P_0}{V_0} \quad (6.23)$$

Definido o valor do indutor, a próxima etapa é a confecção deste. Os principais passos no projeto físico de indutores com núcleo de ferrite do tipo E, são:

Escolha do Núcleo Adequado: O núcleo mais utilizado é o ilustrado na figura 6.3

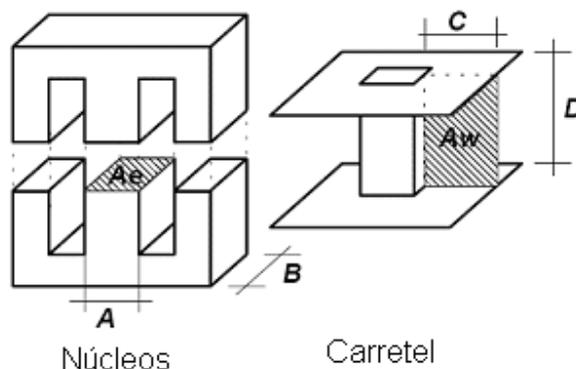


Figura 6.3. Núcleo e carretel do tipo E [27].

A escolha do núcleo a ser utilizado na construção de indutores é realizada com base no cálculo do produto de áreas (para indutores tipo E), de acordo com:

$$A_E A_E = \frac{L \cdot I_0 \cdot I_{IN_MAX}}{B_{MAX} \cdot J_{MAX} \cdot K_W} \cdot 10^4 \quad (6.24)$$

Onde:

A_E – Área da secção transversal do núcleo;

A_W – Área da janela do núcleo.

O fator 10^4 na equação (6.24) foi acrescentado para ajuste de unidade (cm^4).

Na equação (6.24), as variáveis do denominador B_{MAX} , J_{MAX} , e K_W são estabelecidas inicialmente como parâmetros na construção do indutor e apresenta as seguintes características:

- K_W : Os enrolamentos ocupam apenas parte da janela disponível, devido à geometria circular dos condutores. A constante K_W denominada fator de ocupação do cobre dentro do carretel, representa a percentagem da janela central ocupada pelo enrolamento. Normalmente este valor se situa entre 0,3 e 0,7;
- B_{MAX} : É a máxima densidade de fluxo magnético no núcleo antes que haja saturação e o elemento sai da sua região linear. Para núcleos de ferrite comuns o valor de B_{MAX} gira em torno de 0,3T (este valor é devido à curva de magnetização do material magnético);
- J_{MAX} : É o máximo valor da densidade de corrente nos condutores por área, depende do material utilizado nos enrolamentos. Valores típicos situam-se entre 200 e 450A/cm².

As variáveis do numerador, indutância e valor de corrente são calculadas através do projeto do conversor *boost*.

Após calcular o valor do produto de áreas $A_E A_W$, consultam-se as tabelas dos fabricantes disponíveis para encontrar o valor mais próximo do calculado. Os fabricantes de núcleos oferecem formatos padrões de núcleos E, e deve-se selecionar o núcleo com o $A_E A_W$ maior e mais próximo do calculado.

Com o núcleo escolhido, alguns parâmetros tornam-se conhecidos:

- A_E – Área da secção transversal do núcleo;
- A_W – Área da janela do núcleo;
- $A_E A_W$ – Produto de áreas;
- L_T – Comprimento médio de uma espira;
- V_E – Volume do núcleo.

Determinação do Número de Espiras do Indutor

O número de espiras do indutor é obtido diretamente da equação (6.25):

$$N = \frac{L \cdot I_{IN_MAX}}{B_{MAX} \cdot A_E} \quad (6.25)$$

Onde:

- L – Valor da Indutância;
- I_{IN_MAX} – Valor máximo de corrente no indutor.

Valor do Entreferro

O entreferro é a distância existente entre as duas partes do núcleo, conforme ilustrado na figura 6.4. O núcleo é separado ao meio e preenchido por um material isolante. Normalmente utiliza-se o papel.

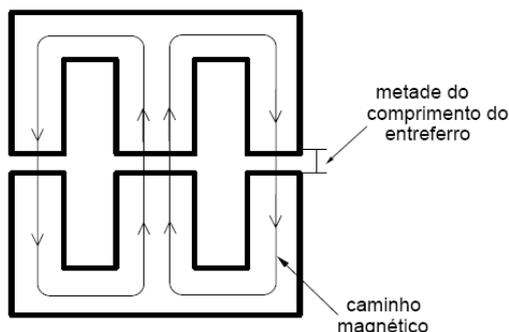


Figura 6.4. **Distribuição do entreferro.**

O entreferro permite ao indutor operar com maiores valores de corrente nos enrolamentos sem ocorrer saturação no núcleo. O valor do entreferro pode ser encontrado de acordo com:

$$L_{ENTREFERRO} = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A_E}{L} \cdot 10^{-2} \quad (6.26)$$

Onde:

- N – Número de espiras;
- L – Valor da indutância;
- μ_0 - Permeabilidade magnética do meio.

O fator 10^{-2} é colocado para fazer o ajuste de unidades, tornando o comprimento do entreferro em cm.

O valor calculado na equação (6.26), informa o comprimento total do entreferro, no caso dos núcleos do tipo E, onde o entreferro é colocado nas pernas laterais. Este valor terá que ser dividido por dois, pois o entreferro se distribuirá entre as duas pernas laterais.

Dimensionamento da Bitola dos Condutores

O cálculo da bitola necessária para conduzir a corrente do enrolamento depende da máxima densidade de corrente admitida no condutor, sem que haja aquecimento. Este pode ser encontrado de acordo com:

$$S_{fio} = \frac{I_{IN_MAX}}{J_{MAX}} \quad (6.27)$$

Geralmente utilizam-se condutores associados em paralelo para conduzir a corrente sem superaquecer os fios condutores. O número de condutores pode ser calculado de acordo com:

$$\eta_{condutores} = \frac{S_{fio}}{S_{escolhido}} \quad (6.28)$$

Onde $S_{escolhido}$ é o condutor escolhido para fazer os enrolamentos.

6.3.3. Projeto do Estágio de Potência do Pré-Regulador *Boost* 1 - Célula Fotovoltaica

Os dados do projeto para o presente conversor são os relacionados na tabela 6.2

Tabela 6.2. Especificações do conversor *boost* 1.

Especificação	Valor
Potência de Entrada (P_I)	244W
Potência de Saída (P_O)	237W
Tensão Máxima na Entrada do Conversor (V_{IN_MAX})	28,8V
Tensão Mínima na Entrada do Conversor (V_{IN_MIN})	19,2V
Tensão Nominal na Entrada do Conversor (V_{IN})	24V
Frequência de Chaveamento (f)	25kHz
Rendimento Esperado (η)	97%
Tensão na Saída do Conversor (V_O)	48V
Máxima ondulação da Tensão na Saída (ΔV_O)	2%
Máxima Ondulação de Corrente na entrada (ΔI_I)	20%

Os cálculos dos elementos da parte de potência do conversor constam dos seguintes passos:

(a) Dimensionamento do Filtro de Entrada - Indutor

Inicialmente calcula-se a máxima corrente de entrada do conversor, que pode ser encontrada pela substituição dos valores de projeto, na equação (6.15):

$$I_{IN_MAX} = \frac{237}{0,97 \cdot 19,2} = 12,72A \quad (6.29)$$

A máxima variação da corrente de entrada pode ser calculada de acordo com a equação (6.16) e supondo uma variação máxima permitida da corrente de indutor de 20%:

$$\Delta I_{I_B} = 0,2 \cdot 12,72 = 2,54A \quad (6.30)$$

O valor da razão cíclica, para a tensão mínima de entrada, pode ser encontrado a partir dos valores de projeto, aplicando a equação (6.11):

$$D_{MIN} = 1 - \frac{19,2}{48} = 0,6 \quad (6.31)$$

O valor do indutor é então calculado, em função da ondulação da máxima corrente de entrada permitida, frequência de chaveamento, tensão nominal na saída e razão cíclica mínima, de acordo com a equação (6.14):

$$L = \frac{24}{25 \cdot 10^3 \cdot 2,54} \cdot 0,6 = 227 \mu H \quad (6.32)$$

Definido o valor do indutor, calculam-se os dados de construção deste, com os seguintes passos:

Escolha do Núcleo Adequado

A corrente nominal de saída I_0 pode ser encontrada substituindo os valores de projeto na equação (6.23):

$$I_0 = \frac{237}{48} = 4,94 A \quad (6.33)$$

A escolha do núcleo é feita com base no produto de áreas dada pela equação (6.24) e supondo:

- $K_w = 0,45$;
- $B_{max} = 0,3 T$;
- $J_{max} = 250 A/cm^2$.

$$A_e A_w = \frac{227 \cdot 10^{-6} \cdot 12,72 \cdot 4,94}{0,3 \cdot 250 \cdot 0,45} \cdot 10^4 = 4,23 \quad (6.34)$$

Consultando os catálogos dos fabricantes, seleciona-se o núcleo E 42/21/12, que possui um núcleo com $A_e A_w$ igual a 4,6 que o valor maior e mais próximo do valor calculado na equação (6.10).

Após a escolha do núcleo a ser utilizado, alguns parâmetros tornam-se conhecidos:

- A_e – Área da secção transversal do núcleo = $1,81 \text{ cm}^2$;

- A_w – Área da janela do núcleo = 2,56 cm²;
- $A_e A_w$ – Produto de áreas = 4,63 cm⁴;
- L_t – Comprimento médio de uma espira = 9,7 cm;
- V_e – volume do núcleo = 17,6 cm³.

Determinação do Número de Espiras do Indutor

É obtido diretamente da equação (6.25):

$$N = \frac{227 \cdot 10^{-6} \cdot 12,72}{0,3 \cdot 1,81} \cdot 10^4 = 53,18 \quad (6.35)$$

Aproxima-se o número para 54 espiras.

Valor do Entreferro

O valor do entreferro pode ser calculado pela aplicação da equação (6.26):

$$L_{entreferro} = \frac{54^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,81}{2 \cdot 227 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-2} = 0,14 \text{ cm} = 14 \text{ mm} \quad (6.36)$$

Cálculo da Bitola dos Condutores

É calculado pela aplicação da equação (6.27):

$$S_{fio} = \frac{12,72}{250} \text{ cm}^2 = 0,0508 \text{ cm}^2 = 5,08 \text{ mm}^2 \quad (6.37)$$

Utiliza-se 5 fios em paralelo, cada um com 1mm² de área quadrada, para evitar superaquecimento dos fios condutores.

(b) Dimensionamento do Filtro de Saída - Capacitor

A partir de uma variação da tensão na saída de 2% (dado de projeto) e pela aplicação da equação (6.22), tem-se:

$$C = \frac{4,94}{25 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 24} \cdot \frac{(48 - 24)}{48} = 0,823 \text{ mF} \quad (6.38)$$

Foi escolhido um capacitor eletrolítico de 1mF/50V.

(c) Dimensionamento do Dispositivo Semicondutor

A corrente máxima na entrada do conversor foi calculada na equação (6.29) e representa a máxima corrente a passar pela chave semicondutora, portanto:

$$I_{MAX_S} = 12,72A \quad (6.39)$$

A tensão reversa máxima suportada pelo dispositivo é aproximadamente igual à tensão de carga V_0 , portanto:

$$V_{RMAX_S} = 48V \quad (6.40)$$

A frequência de chaveamento, que estabelece a região segura de trabalho, é 25kHz.

Por questão de disponibilidade de componentes, escolhe-se o MOSFET IRPF 048N da International Rectifier, com as seguintes características nominais: $I_d = 64A$ e $V_D = 55V$.

(d) Dimensionamento do Diodo Boost D_b

A solicitação de corrente no diodo é a mesma da carga I_0 :

$$I_{Dmed} = 4,94A \quad (6.41)$$

A tensão reversa máxima sobre o diodo é igual à tensão de saída, 48V.

$$V_{RMAX_D} = 48V \quad (6.42)$$

Escolhe-se o diodo de frequência BYW 51, por questão de disponibilidade no laboratório, com corrente nominal de 15A e tensão reversa máxima de 50V.

6.3.4. Dimensionamento do Banco de Baterias

Considerando uma autonomia de 5 dias, uma descarga máxima de 33,33% e aplicando a equação (4.6):

$$CAB = \frac{5500,80 \cdot 5}{\frac{33,33}{100}} = 83345,45Wh \quad (6.43)$$

Convertendo para Ah, através da equação (4.7):

$$CAB = \frac{83345,45}{48} = 1736,4Ah \quad (6.44)$$

Existem diversas formas de atingir essa capacidade para uma tensão de saída de 48V.

Uma combinação possível, empregando baterias de 12V, seria o emprego de 12 baterias com capacidade individual de 150Ah, ligadas em 3 conjuntos de 4 conectadas em paralelo.

6.3.5. Projeto do Estágio de Potência do Pré-Regulador *Boost 2* - Banco de baterias

Os dados de projeto são os contidos na tabela 6.3.

Tabela 6.3 Especificações do conversor *boost 2*.

Especificação	Valor
Potência de Entrada (P_1)	$237(P_0/\eta)$
Potência de Saída (P_0)	230W
Tensão Mínima na Entrada do Conversor (V_{IN_MIN})	38,4V (Tensão Mínima Permitida na Bateria)
Tensão Nominal na Entrada do Conversor (V_{IN})	48V (Tensão inicial de trabalho da bateria)
Freqüência de Chaveamento (f)	25 kHz
Rendimento Esperado (η)	97%
Tensão na Saída do Conversor (V_0)	48V
Máxima Ondulação da Tensão na Saída (ΔV_0)	2%
Máxima Ondulação de Corrente na entrada (ΔI_I)	20%

Os cálculos dos elementos da parte de potência do conversor constam dos seguintes passos:

(a) Dimensionamento do Filtro de Entrada - Indutor

O calculo da máxima corrente de entrada é dado pela equação (6.15):

$$I_{IN_MAX} = \frac{230}{0,97 \cdot 38,4} = 6,17A \quad (6.45)$$

A máxima variação da corrente de entrada, de acordo com a equação (6.16), é:

$$\Delta I_{I_B} = 0,2 \cdot 6,17 = 1,23A \quad (6.46)$$

A razão cíclica, de acordo com a equação (6.11), é:

$$D_{MIN} = 1 - \frac{38,4}{48} = 0,2 \quad (6.47)$$

Calcula-se o valor do indutor pela aplicação da equação (6.14):

$$L = \frac{48}{25 \cdot 10^3 \cdot 1,23} \cdot 0,2 = 312 \mu H \quad (6.48)$$

Escolha do Núcleo Adequado

A corrente nominal de saída I_0 é encontrada através da equação (6.23):

$$I_0 = \frac{230}{48} = 4,79 A \quad (6.49)$$

O núcleo é escolhido com base no produto de áreas dado pela equação (6.24) e supondo:

- $K_w = 0,3$;
- $B_{\max} = 0,3 T$;
- $J_{\max} = 250 A/cm^2$.

$$A_e A_w = \frac{312 \cdot 10^{-6} \cdot 6,17 \cdot 4,79}{0,3 \cdot 250 \cdot 0,3} \cdot 10^4 = 4,09 \quad (6.50)$$

Consultando os catálogos dos fabricantes, seleciona-se o núcleo E 42/21/12, que possui um núcleo com $A_e A_w$ igual a 4,6.

Após a escolha do núcleo a ser utilizado, alguns parâmetros tornam-se conhecidos:

- A_e – Área da Secção Transversal do Núcleo = $1,81 \text{ cm}^2$;
- A_w – Área da Janela do Núcleo = $2,56 \text{ cm}^2$;
- $A_e A_w$ – Produto de Áreas = $4,63 \text{ cm}^4$;
- L_t – Comprimento Médio de Uma Espira = $9,7 \text{ cm}$;
- V_e – Volume do Núcleo = $17,6 \text{ cm}^3$.

Determinação do Número de Espiras do Indutor

É obtido diretamente da equação (6.25):

$$N = \frac{312 \cdot 10^{-6} \cdot 6,17}{0,3 \cdot 1,81} \cdot 10^4 = 35,45 \quad (6.51)$$

Aproxima-se o número para 36 espiras.

Valor do Entreferro

O valor do entreferro é então calculado pela aplicação da equação (6.26):

$$L_{\text{entreferro}} = \frac{36^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,81}{2 \cdot 312 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-2} = 0,05\text{cm} \quad (6.52)$$

Cálculo da Bitola dos Condutores

O cálculo da bitola necessária é calculado de acordo com a equação (6.27):

$$S_{\text{fio}} = \frac{6,17}{300} = 0,0205\text{cm}^2 = 2,056\text{mm}^2 \quad (6.53)$$

Utiliza-se 2 fios em paralelo, cada um com 1mm^2 de área quadrada, para evitar superaquecimento dos fios condutores.

(b) Dimensionamento do Filtro de Saída - Capacitor

A partir da aplicação da equação (6.22), têm-se:

$$C = \frac{4,79}{25 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 48} \cdot \frac{(48 - 38,4)}{48} = 0,4\mu\text{F} \quad (6.54)$$

Por questão de disponibilidade de componente, foi escolhido um capacitor eletrolítico de $1\text{mF}/50\text{V}$.

(c) Dimensionamento do Dispositivo Semicondutor

Pela aplicação da equação (4.11), têm-se:

$$I_{\text{MAX}_S} = 6,17\text{A} \quad (6.55)$$

A tensão reversa máxima é aproximadamente igual à tensão de carga V_0 :

$$V_{\text{RMAX}_S} = 48\text{V} \quad (6.56)$$

A terceira variável de relevância é a frequência de chaveamento que é 25kHz .

Por questão de disponibilidade de componente foi usado o mesmo MOSFET utilizado no conversor *boost* 1 IRPF 048N.

(d) Dimensionamento do Diodo Boost D_b

A solicitação de corrente no diodo é a mesma da carga I_0 :

$$I_{\text{Dmed}} = 4,79\text{A} \quad (6.57)$$

A tensão reversa máxima no diodo é igual à tensão na saída:

$$V_{RMAX_D} = 48V \quad (6.58)$$

Escolhe-se o diodo de frequência BYW 51, por questão de disponibilidade no laboratório, com corrente nominal de 15A e tensão reversa máxima de 50V.

6.3.6. Projeto do Conversor Bidirecional

Como especificação geral, têm-se os seguintes dados:

- Potência de Saída: $P_0 = 230W$;
- Rendimento Aproximado: $\eta = 97\%$;
- Tensão de Saída: $V_0 = 48V$.

A partir desses dados pode-se estimar a corrente na saída do conversor, pela aplicação da equação:

$$I = \frac{P_0}{V_0} = \frac{230W}{48V} = 4,79A \quad (6.59)$$

A partir da equação (4.7), pode-se determinar o valor de tensão CA, necessária na entrada do conversor, para uma tensão de saída de 48V:

$$V_{L(MAX)} = \frac{48 \cdot \pi}{3} = 50,26V \quad (6.60)$$

Onde o ângulo de disparo foi tomado para a máxima tensão média na saída, ou seja, $\alpha = 0^\circ$.

A tensão inversa máxima aplicada sobre um tiristor é igual à amplitude instantânea máxima de tensão de linha CA, calculada no item anterior, portanto:

$$V_{REVM_TIR} = 50,26V \quad (6.61)$$

Por questão de disponibilidade no laboratório, escolhe-se o tiristor IRKT 41, com corrente nominal de 45A e tensão reversa máxima de 400V.

6.4. Principais Formas de Onda Obtidas na Simulação

A fim de comprovar a validade do equacionamento apresentado neste capítulo, foram efetuadas simulações utilizando o software Pspice, de forma a evidenciar a validade da metodologia de projeto dos conversores.

Os circuitos foram implementados utilizando os modelos dos componentes reais escolhidos, disponíveis em suas bibliotecas. Os circuitos simulados são apresentados, bem como as formas de onda principais e comentários acerca das principais características dos conversores.

6.4.1. Conversor Elevador 1 - Célula PV

Na figura 6.5. têm-se o esquemático do conversor *boost* 1 que transforma a tensão nominal de 24V presentes na saída da célula fotovoltaica, para ser fornecida aos terminais da bateria. Esta tensão deve estar regulada em 48V, tarefa executada pelo conversor, que neste caso atua como um dobrador de tensão.

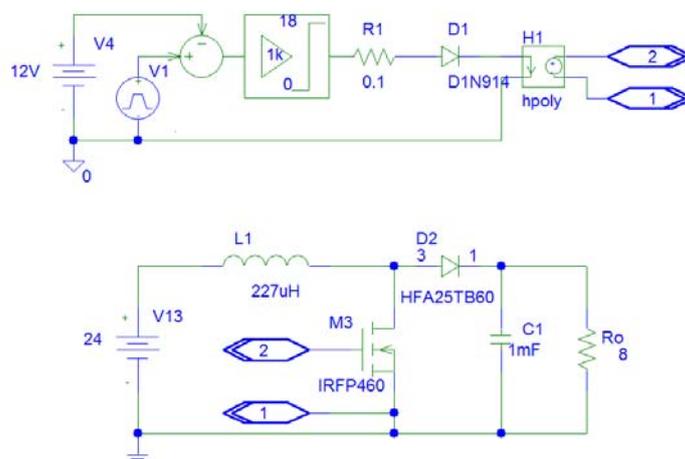


Figura 6.5. Circuito do conversor elevador da célula fotovoltaica.

Na figura 6.6 vê-se as formas de onda da tensão na entrada de 24V (traço reto e mais fino) e a saída em 48V, para uma frequência de 25 kHz, conversor *boost*.

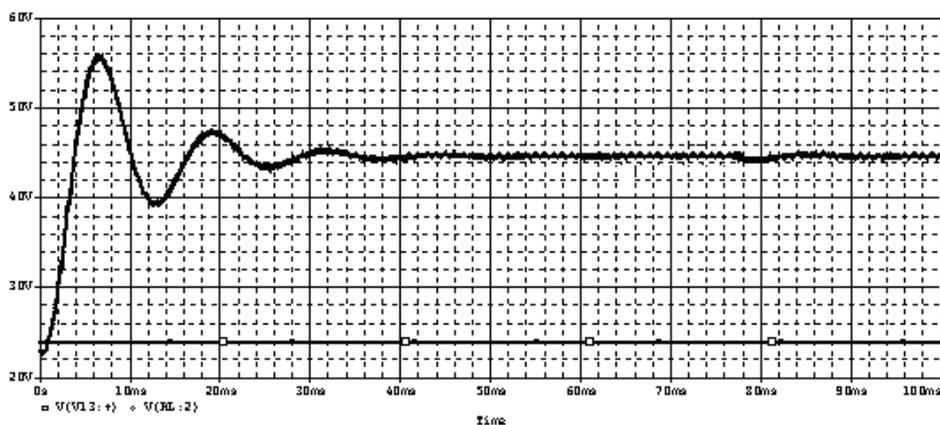


Figura 6.6. Tensão de entrada e de saída do conversor elevador *boost 1*- célula PV.

Observa-se o transitório da tensão de saída que se estabiliza rapidamente. Aqui fica caracterizado o funcionamento deste conversor como regulador da tensão de saída da célula fotovoltaica. Verifica-se através da curva de saída que, após o transitório, a tensão de saída do conversor se estabiliza em 48V, necessária para manter a bateria em flutuação.

Na figura 6.7 vê-se o sinal de controle no *gate* do MOSFET de potência, para uma frequência de 25 kHz, e razão cíclica de 50% (necessário para tornar o circuito um dobrador de tensão).

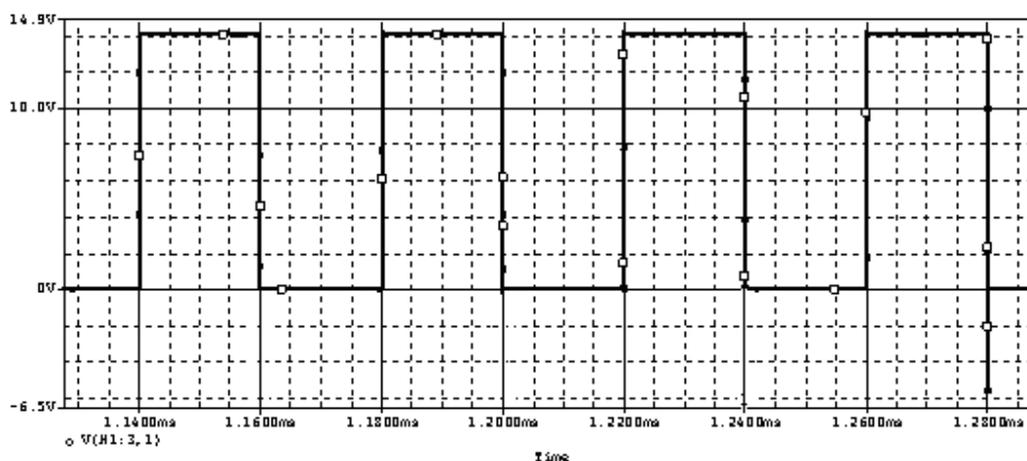


Figura 6.7. Sinal de controle no *gate* do MOSFET de potência do conversor elevador *boost 1*- célula PV.

Observa-se, neste caso, que o tempo correspondente a chave fechada é de 20 μ s, para um período de 40 μ s. Na figura 6.8 vê-se o detalhe da corrente no indutor do conversor *boost 1*.

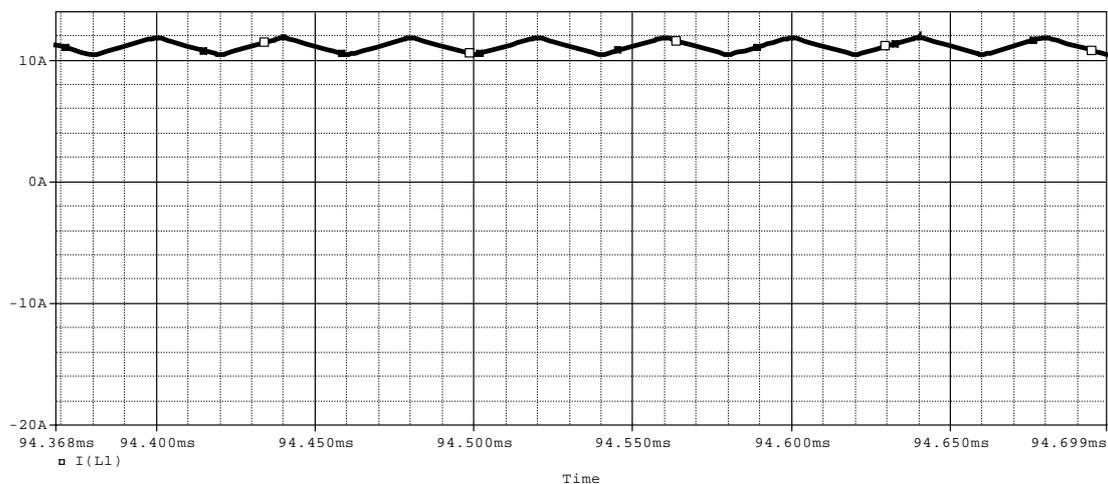


Figura 6.8. Carga e descarga do indutor do conversor *boost*.

Nesta simulação percebe-se a carga e a descarga do indutor, provocadas pela abertura e fechamento do MOSFET de potência a uma frequência de 25 kHz. A razão cíclica define a tensão na saída do conversor.

6.4.2. Conversor Elevador Boost 2 - Banco de Baterias

Na figura 6.9 têm-se o esquemático, em Pspice, do conversor *boost* 2, que regula a tensão de saída do banco de baterias para uma tensão nominal de 48V, a ser conectada ao barramento CC de saída.

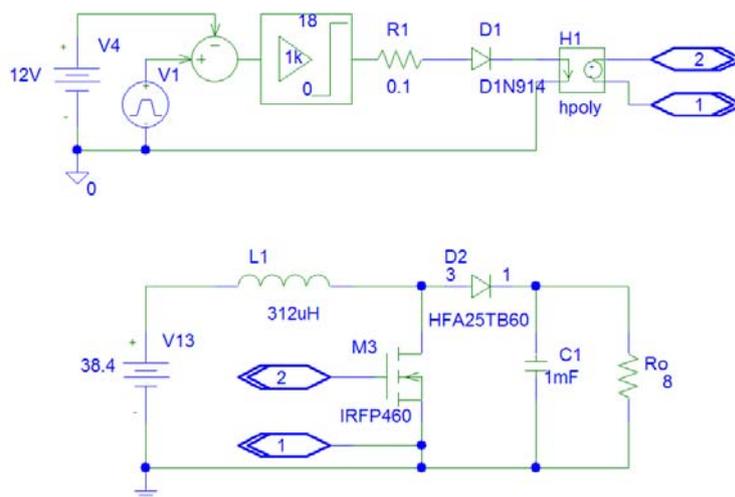


Figura 6.9. Circuito do conversor elevador das baterias.

Na figura 6.10 observa-se as tensões de entrada e de saída para o conversor *boost* 2, relativo ao banco de baterias.

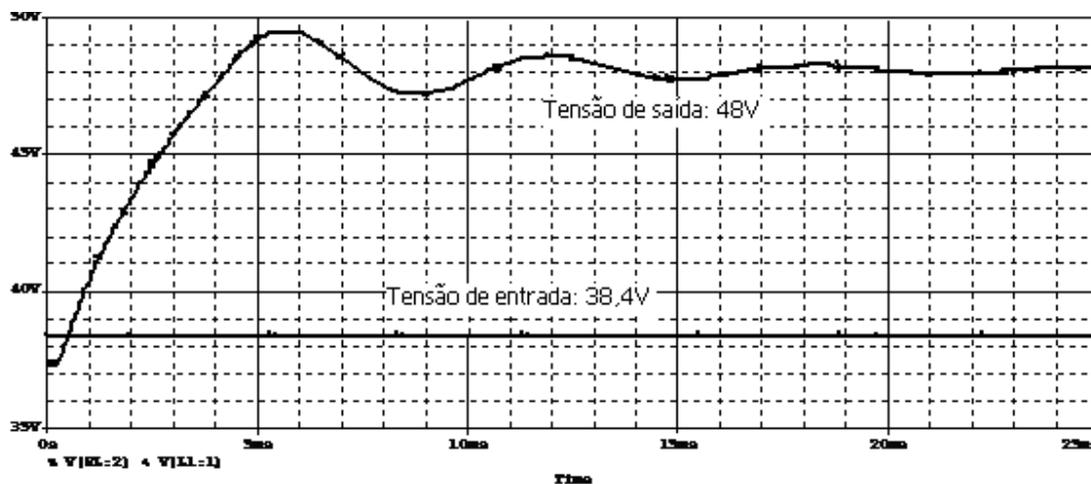


Figura 6.10. Tensão de entrada e saída do conversor elevador da bateria.

A função deste conversor é regular a tensão em descarga das baterias, presente na sua entrada, para um nível de 48V, na sua saída. Para isto a simulação é feita para o pior caso possível: a bateria no seu nível mínimo de tensão permitida, que é de 38,4V.

6.4.3. Conversor Bidirecional

Na figura 6.11. têm-se o esquemático do conversor bidirecional representado pela ponte retificadora trifásica totalmente controlada, que faz o a ligação entre os baramentos CC e CA.

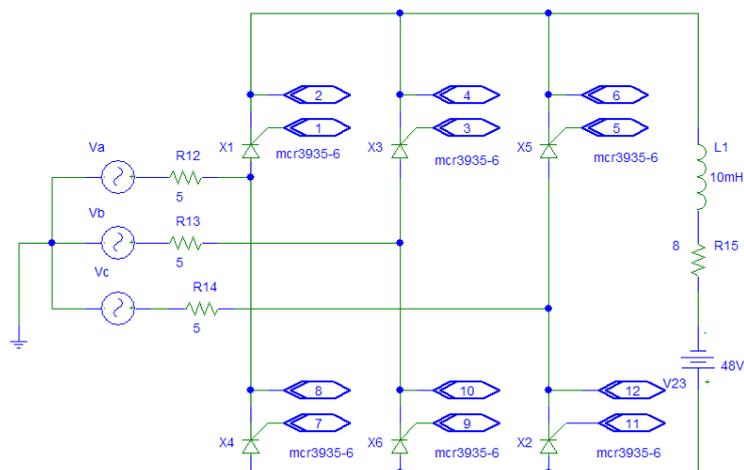


Figura 6.11. Circuito simulado no software Pspice do conversor bidirecional.

(a) Atuação como Retificador

Na figura 6.12 têm-se o conversor atuando como retificador.

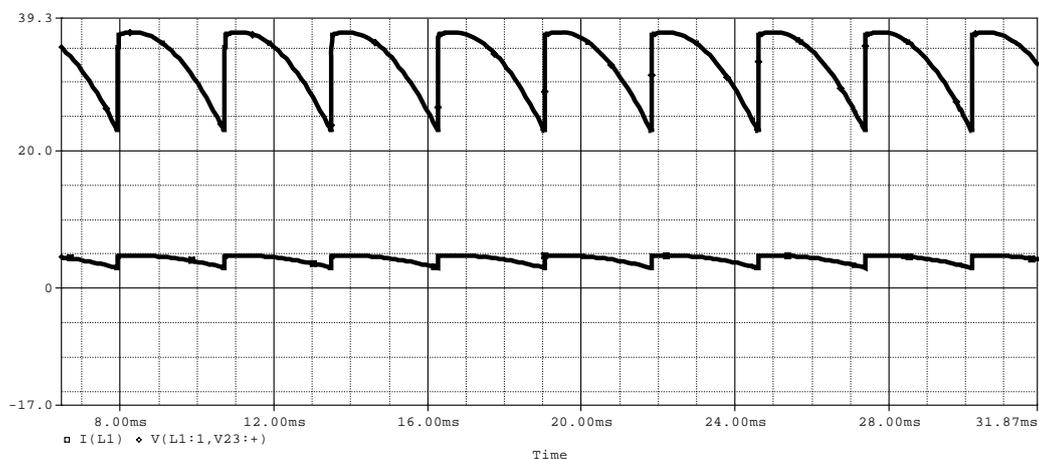


Figura 6.12. Tensão e corrente média na saída para atuação do conversor como retificador.

Para simulação da estrutura como retificador faz-se a retirada da fonte de tensão e do indutor presente na saída do circuito simulado da figura 6.13. Em seguida procura-se um ângulo de disparo próximo de 40° para reproduzir as condições semelhantes de disparo e tensão obtidas na parte de experimentação de forma a permitir a comparação, para tirar conclusões.

O gráfico da figura 6.12 mostra que a tensão e a corrente média na saída do conversor permanecem sempre positivas, evidenciando a atuação do conversor como retificador.

(b) Atuação como Inversor

Para simulação da estrutura como inversor coloca-se o indutor de 10mH juntamente com fonte de tensão CC de 48V na saída para as mesmas condições de tensão do circuito. Na seqüência procura-se reproduzir uma condição de ângulo de disparo com valores acima de 90° (condição teórica para funcionamento como inversor).

A aquisição das curvas nas simulações feitas é a ilustrada na figura 6.13, onde observa-se as formas de onda da tensão e corrente média na saída.

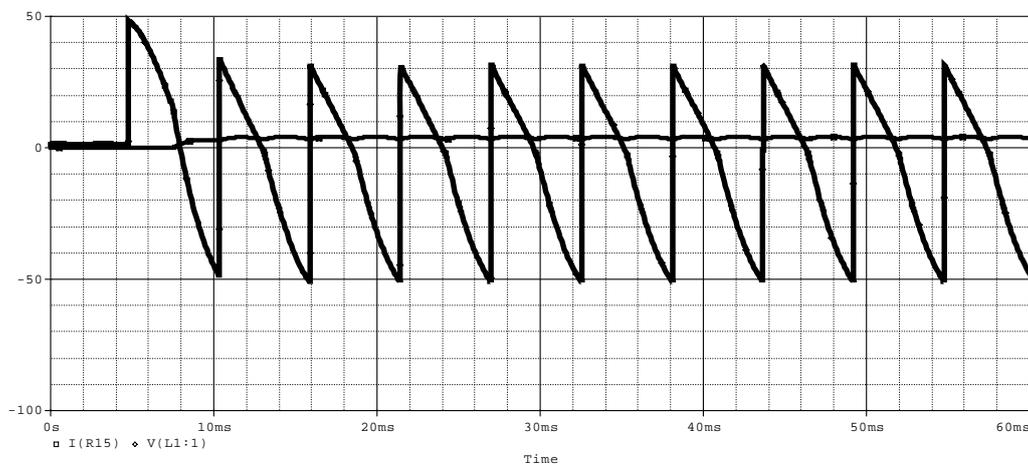


Figura 6. 13. Tensão e corrente média na saída para atuação do conversor como inversor.

Por esse resultado comprova-se, através da simulação, que a estrutura do conversor bidirecional está funcionando como inversor, pois a somatória das áreas sob o gráfico (áreas positiva e negativas) permanece negativa configurando, portanto, o funcionamento do conversor como inversor.

6.5. Conclusão

A simulação dos conversores de energia é uma etapa muito importante no projeto de fontes de energia, pois permite ter uma visão do funcionamento dos conversores antes da montagem, permitindo eventuais correções sem o desperdício de material.

Um conversor bidirecional, representado por uma ponte retificadora trifásica totalmente controlada, é uma estrutura muito eficaz quando se deseja fazer conversão CC CA ou CA CC, pois com uma só estrutura é possível realizar duas conversões. Têm-se neste caso uma economia de recursos.

7 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS ESPERIMENTAIS

7.1. Introdução

O fornecimento de energia elétrica para sistemas de comunicações em localidades isoladas, em especial na Amazônia, a partir de células fotovoltaicas (células PV) é plenamente justificável, face os custos de transporte de energia elétrica. A desvantagem do uso de células fotovoltaicas em princípio, é o seu baixo nível de potência, limitando-se a cargas de pequeno porte, em pequenas comunidades.

Nos capítulos precedentes realizou-se o estudo, projeto e simulações dos conversores: bidirecional, *boost*, bateria e célula fotovoltaica, bem como dos circuitos de controle e tecnologias associadas. Cabe neste momento apresentar os resultados experimentais dos circuitos projetados anteriormente.

Neste capítulo é feita à integração dos estágios componentes do sistema de geração simultânea proposto. As aquisições das formas de onda obtidas são comentadas e analisadas. São apresentadas ainda, as descrições de funcionamento dos diversos estágios.

Realizaram-se diversos ensaios, em diferentes pontos de operação dos conversores, para verificar o comportamento em diversas faixas de operação prevista. São apresentados os esquemáticos completo dos circuitos implementados, a lista de material, e ainda várias fotografias destacando os principais elementos do circuito.

7.2. Esquemáticos dos Circuitos Implementados

A montagem feita em laboratório permitiu comprovar resultados esperados e ajustar as variáveis de controle. Os circuitos de potência e de controle foram montados e testados em laboratório. Na seqüência têm-se os esquemáticos e a descrição de funcionamento das placas de controle e dos estágios de potência.

7.2.1. Conversor Elevador Boost 1 - Célula PV

O protótipo implementado do conversor elevador *boost* 1, que faz a interface entre a célula fotovoltaica e o conjunto do banco de baterias, é representado pelo diagrama esquemático ilustrado na figura 7.1.

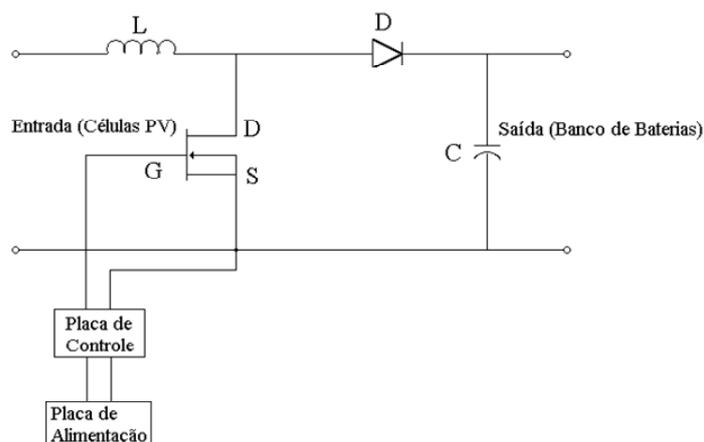


Figura 7.1. Esquemático do conversor *boost* 1 - célula PV.

Na entrada do conversor *boost* 1 têm-se uma célula fotovoltaica que fornece um nível de tensão em torno de 24V. Este circuito é destinado a elevar a tensão da célula fotovoltaica, a tensão do banco de baterias que é de 48V, adquirindo um nível compatível ao da bateria.

O controle é realizado por um circuito baseado no microcontrolador PIC 16f877, com uma programação estabelecida para, a partir dos 24V esperados na célula fotovoltaica, entregar uma tensão regulada de 48V, na saída. O capacitor C tem a função de filtrar a tensão de saída CC, antes que seja entregue aos terminais da bateria.

O esquemático do protótipo da placa de controle implementado é ilustrado na figura 7.2. Observa-se que o circuito foi montado em uma placa de circuito impresso separada, de forma a permitir a separação de circuito de potência e circuito de sinal.

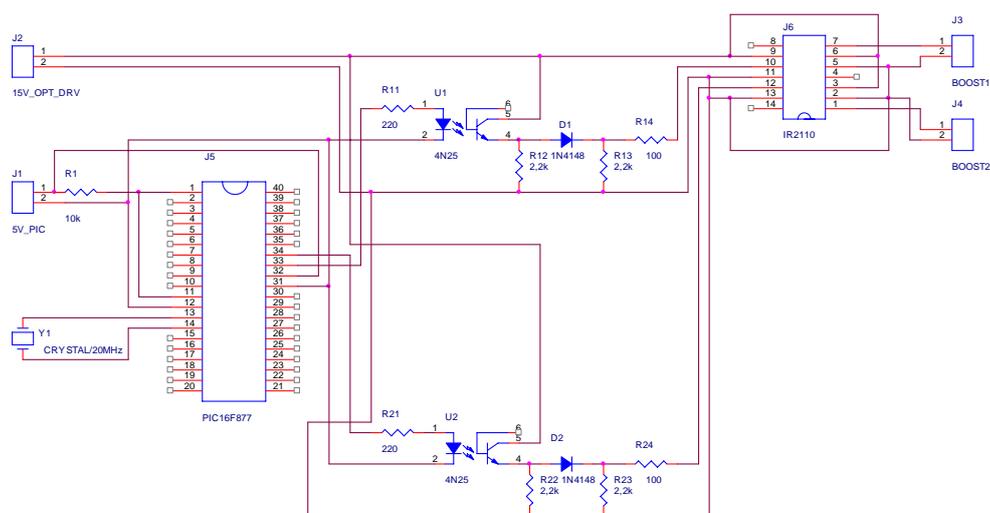


Figura 7.2. Circuito de disparo do conversor *boost*.

O circuito *driver*, na saída da placa de disparo, é uma interface entre o controle e o interruptor MOSFET. Tem a função de condicionar o sinal de controle aos níveis especificados pelo interruptor.

O *driver* ainda melhora o desempenho da estrutura, pois garante pulsos de melhor qualidade impostos ao interruptor, tornando sua comutação mais favorável.

Quanto à alimentação do *driver*, é necessária a utilização de duas fontes isoladas, uma de +15Vcc e outra de +5Vcc. Foram utilizadas as fontes disponíveis na bancada do laboratório.

7.2.2. Conversor Elevador *Boost 2* - Banco de Baterias

O protótipo implementado do conversor elevador *boost 2*, que faz a interface entre o banco de baterias e o barramento CC de saída é representado pelo diagrama esquemático da figura 7.3.

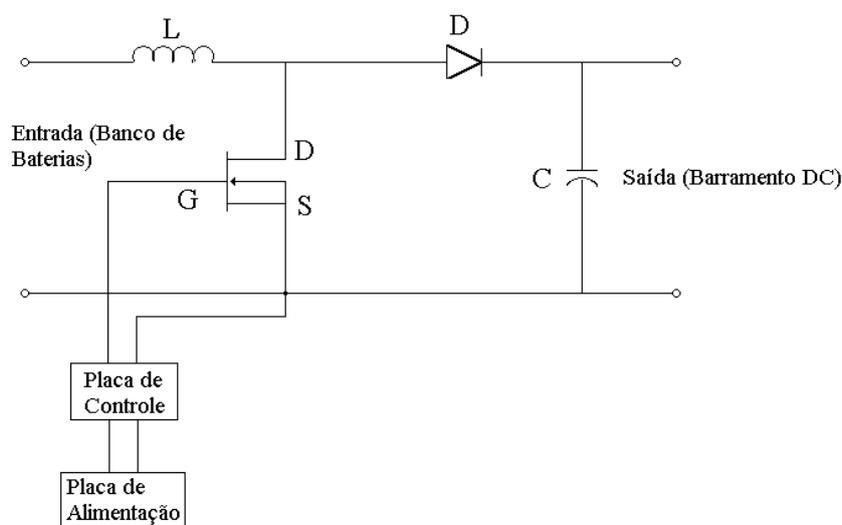


Figura 7.3. Esquemático do conversor *boost 2* - banco de baterias.

Este circuito basicamente é composto da mesma forma que o anterior, mudando apenas os níveis de tensão presentes na entrada e na saída e a programação de disparo, presente no *gate* do MOSFET de potência.

Com pode-se observar, o circuito de comando usado para colocar o MOSFET em condução ou bloqueio é essencialmente o mesmo do item anterior, aproveitando um recurso adicional do microcontrolador, que tem duas saídas PWM.

O microcontrolador comanda este conversor *boost* através de um segundo sinal PWM, acoplado opticamente por meio de um drive de acionamento (IR2110).

7.2.3. Conversor Bidirecional

Para o projeto do comando do conversor, é utilizado o método proposto em [28]. O esquema do protótipo implementado é ilustrado na figura 7.4, apresentando a parte de potência e o controle realizado a partir das placas TZB2-DB.

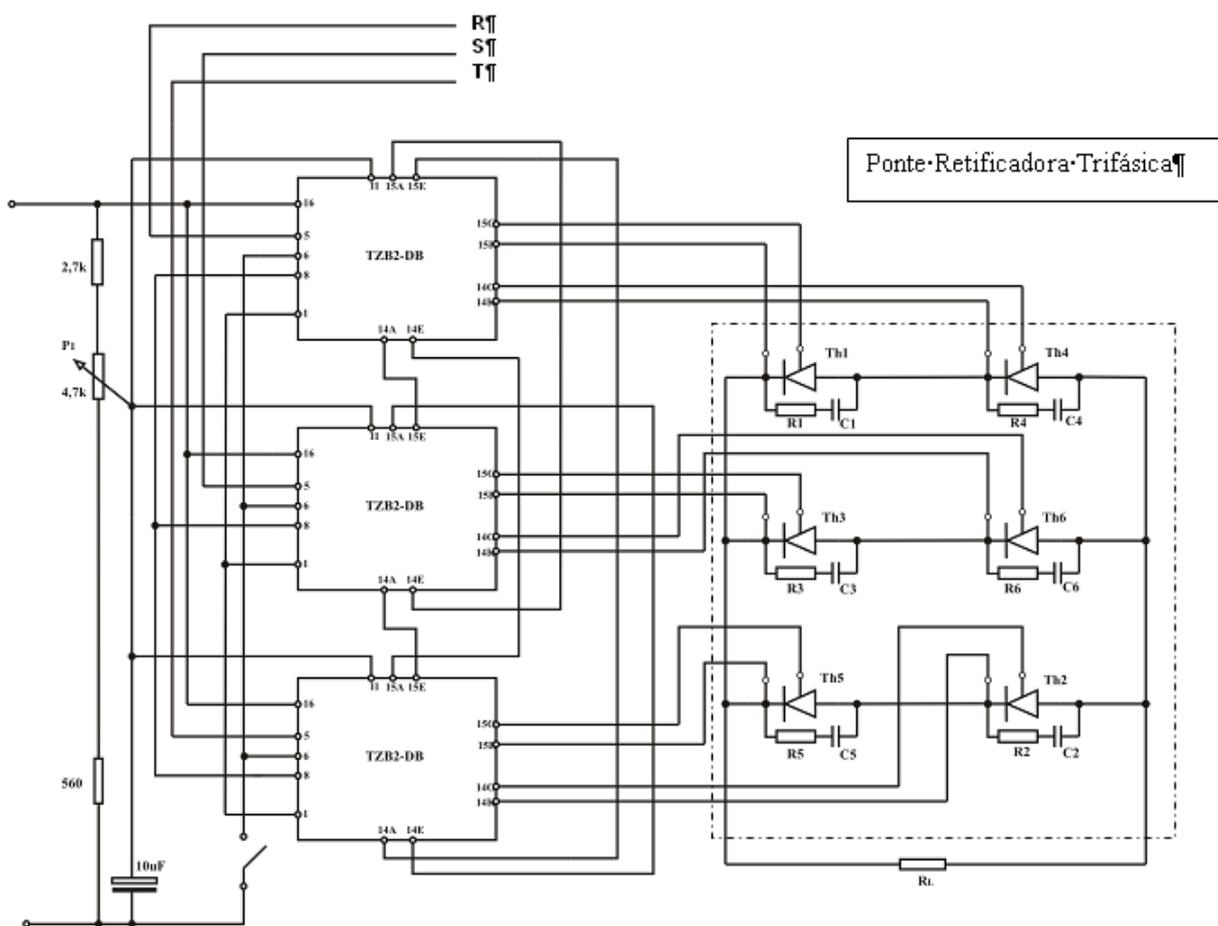


Figura 7.4. Diagrama do conversor bidirecional.

O ângulo de disparo dos tiristores e, conseqüentemente, a tensão CC de saída do conversor, são estabelecidos através do potenciômetro de $4,7k\Omega$, localizado em uma das 3 placas de controle. Cada placa comanda uma fase. A linha tracejada define a parte de potência do conversor formada pela ponte de tiristores ao lado da carga representado pela resistência R_L . Os elementos RC em paralelo com os tiristores são internos a estes.

Conforme mostra a figura 7.4, os circuitos de controle foram implementados em placas de circuito impresso separadas, com a finalidade de facilitar a conexão entre os circuitos integrados TCAs.

Alguns ajustes foram realizados em bancada, no que se referem as rampas das malhas de controle do circuito de disparo, para melhorar a tensão de saída. Também o desbalanceamento da tensão CA trifásica de entrada, provocou distorção nos pulsos da tensão de saída. Apesar disto, considera-se os resultados satisfatórios, pois os modelos deduzidos na teoria são bastante simplificados e não consideram a presença de ruídos indevidos na entrada dos conversores.

A figura 7.5 ilustra o diagrama esquemático de uma placa TZB2-DB do conversor bidirecional implementado.

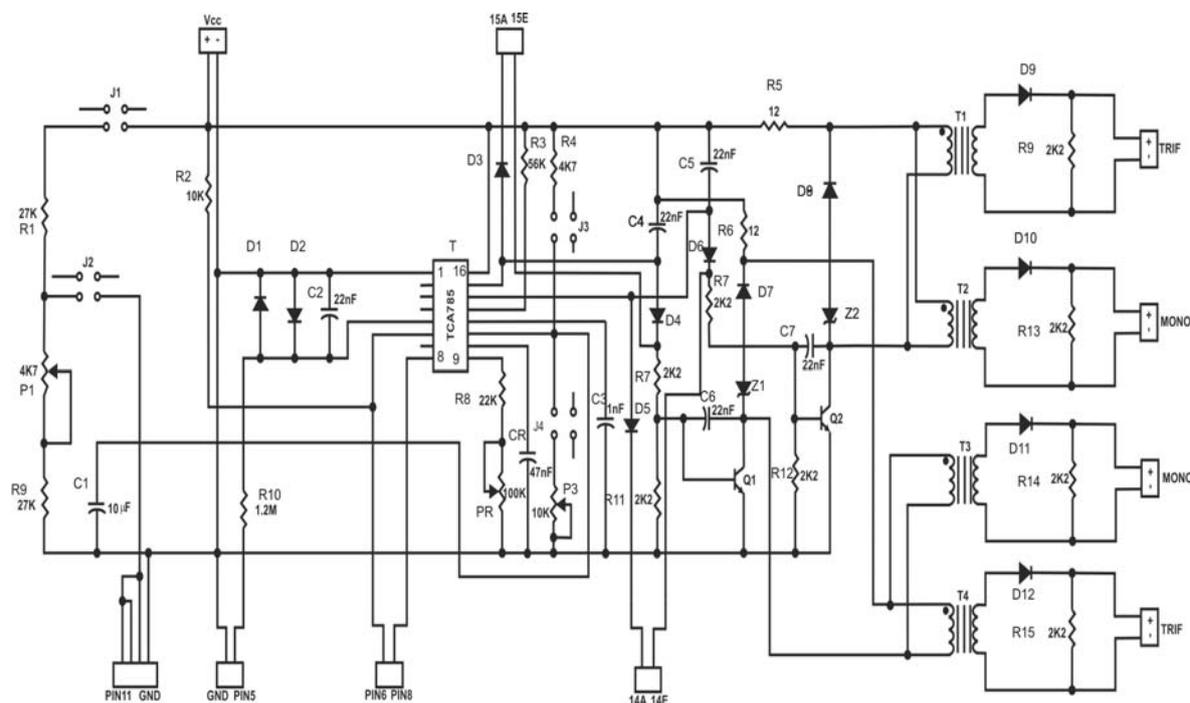


Figura 7.5. Placa de comando responsável pelo gatilhamento de um par de tiristores.

A geração dos pulsos de disparos necessários para o gatilhamento da ponte de tiristores é conseguida através do emprego do CI TCA 785, amplamente utilizados neste tipo de

aplicação. A partir da informação de fase presente no pino 5, o circuito fornece pulsos de disparo, nos pinos 14 e 15.

O ângulo de disparo é determinado pelo nível CC injetado no pino 11 e comum às três placas de forma a garantir a simetria necessária. Os pulsos são amplificados através dos estágios representados por Q1 e Q2 de onde, através dos transformadores de pulso, seguem para o *gatilhamento* dos tiristores.

O pino 15 é responsável pelo tiristor ligado à fase positiva enquanto que o pino 14 dispara o tiristor ligado à fase mais negativa nesse mesmo instante. Os pinos 14 e 15 trocam informações entre as placas de forma que os 6 tiristores entrem em condução de forma simétrica e no tempo certo tendo como princípio a condição de polaridade e o comando específico para o disparo determinado pelo potenciômetro P1 de 4,7k.

As placas foram confeccionadas para trabalhar também como circuito monofásico, através da colocação de alguns *jumpers*: J1, J2, J3 e J4. A programação dos *jumpers*, para transformação monofásico/trifásico é fornecida pela tabela 7.1.

Tabela 7.1. Programação de *jumpers* para passagem monofásico/trifásico.

Operação	J1	J2	J3	J4
Monofásica	Aberto	Aberto	Fechado	Fechado
Trifásico	Fechado	Fechado	Aberto	Aberto

Neste caso, qualquer uma das placas pode ser empregada para comandar um circuito monofásico.

7.3. Integração dos Conversores

Uma foto do conjunto é apresentada na figura 7.6, onde se observa a presença na montagem, de todos os conversores montados em bancada.

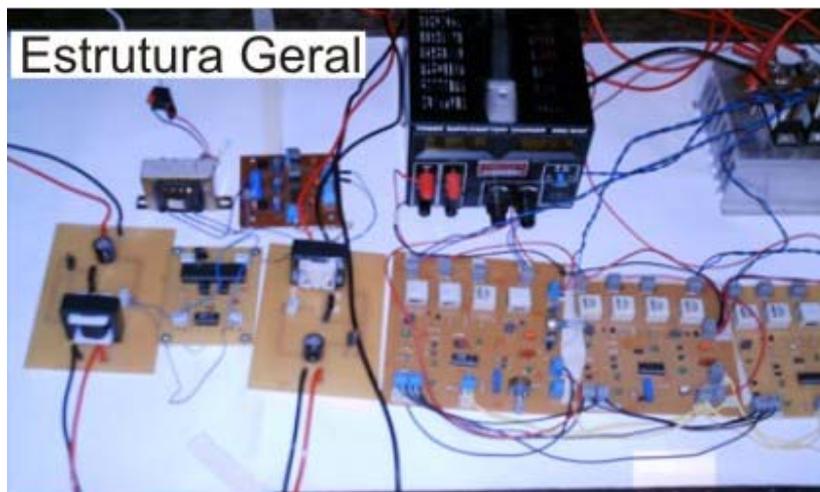


Figura 7.6 **Placas de circuito impresso da montagem.**

A figura 7.7 apresenta uma fotografia do protótipo do conversor bidirecional implementado. Vê-se em primeiro plano as três placas de circuito impresso responsáveis pelo acionamento dos tiristores e ao fundo o circuito de potência e o transformador de alimentação. À direita está posicionado o indutor, presente na carga e à esquerda a fonte de bancada para alimentação das placas.

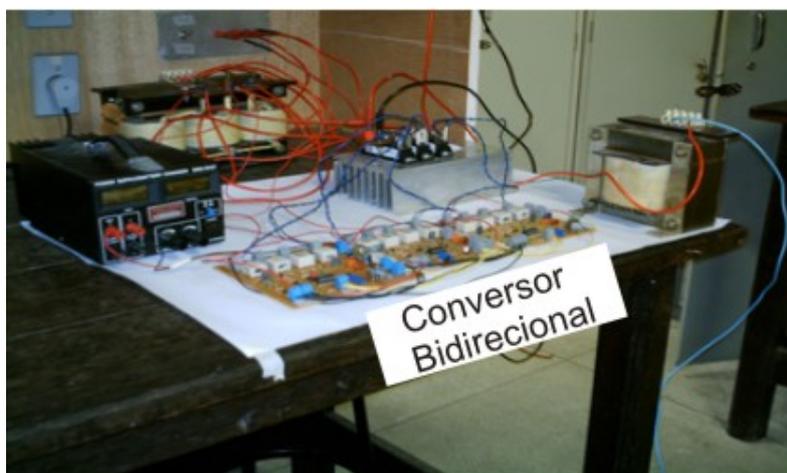


Figura 7.7. **Vista geral do conversor bidirecional.**

Na figura 7.8 é possível ter uma vista panorâmica do conjunto de resistências empregadas durante os ensaios, 16 resistências de $0,5\Omega$, totalizando 8Ω e 16 kW, para obtenção dos resultados experimentais.



Figura 7.8. Vista geral do conjunto de resistências utilizadas durante os ensaios.

Na figura 7.9 é apresentado o detalhe da ponte de tiristores, tendo ao fundo o transformador de alimentação do conversor bidirecional.

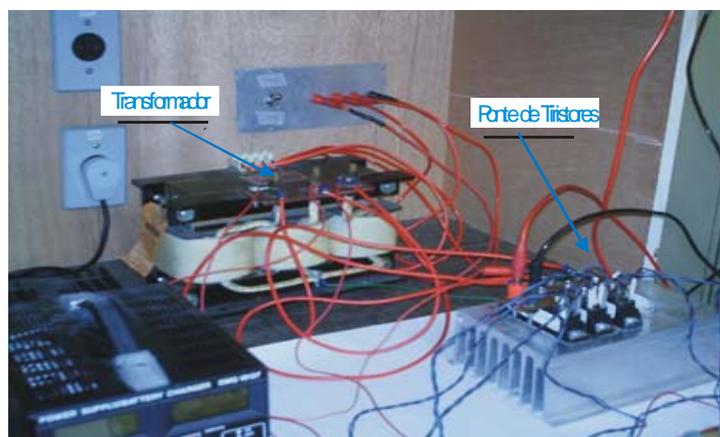


Figura 7.9. Detalhe da ponte de tiristores tendo ao fundo o transformador de alimentação.

Na figura 7.10 é possível observar, em primeiro plano, os dois conversores *boost* implementados, entre estes o circuito de disparo e ao fundo a placa de alimentação.

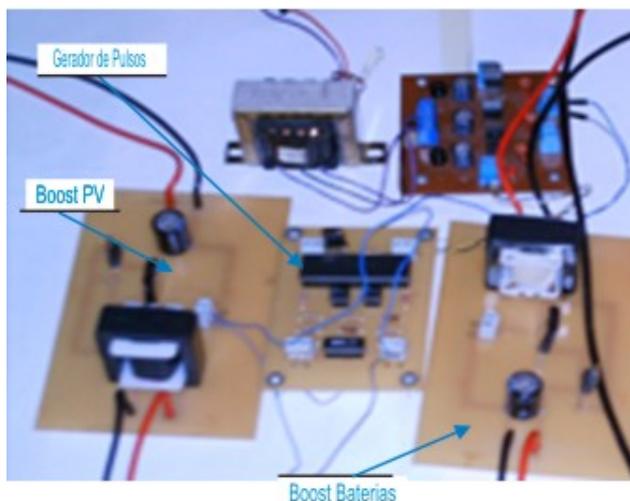


Figura 7.10. Detalhe dos dois conversores *boost* implementados e seu controle baseado no PIC 16F877.

7.4. Especificações dos Componentes Utilizados

Todo o conjunto constitui-se de sete placas de circuito impresso, necessárias para realizar a parte de controle da fonte de tensão para comunidades isoladas proposto e os circuitos de potência associados.

Neste item serão descritos os componentes empregados, suas especificações e quantidades, para os dois conversores *boost* e para o conversor bidirecional montados em bancada, no laboratório de Eletrônica de Potência da UFPA.

7.4.1. Conversores Elevadores *Boost*

A tabela 7.2 fornece a lista de componentes empregados na implementação do *boost* 1.

Tabela 7.2. Relação de componentes do conversor *boost* 1.

Circuito	Componente	Especificação	Simbologia
<i>Boost</i> 1	Indutor	Núcleo EE 42/21/12 N = 54 espiras	L
	Capacitor eletrolítico	1mF – 50V EPCOS	C
	MOSFET de Potência	IRFP048N	M
	Diodo rápido	BYW 51	D

A tabela 7.3 fornece a lista de componentes empregados na implementação da placa de controle digital.

Tabela 7.3. Relação de componentes da placa de controle digital.

Circuito	Componente	Especificação	Simbologia
Placa de Controle Digital	Oscilador a Cristal	20 MHz	Y1
	IR 2110	Circuito Integrado Driver	J6
	4N25	Foto acoplador	U1 e U2
	PIC 16F877	Circuito Integrado Microprocessador	J5
	Resistor	10 k – 1/8W	R2
	Resistor	220 – 1/8 W	R11
	Resistor	2,2 k – 1/8W	R12
	Resistor	2,2 k – 1/8W	R13
	Resistor	100 – 1/8W	R14
	Resistor	220 – 1/8W	R21
	Resistor	2,2 k – 1/8W	R22
Resistor	2,2 k – 1/8W	R23	

A tabela 7.4 fornece a lista de componentes empregados na implementação do *boost 2*.

Tabela 7. 4. Relação de componentes do conversor *boost 2*.

Circuito	Componente	Especificação	Simbologia
<i>Boost 1</i>	Indutor	Núcleo EE 42/21/12 N = 36 Espiras	L
	Capacitor Eletrolítico	1mF – 50V EPCOS	C
	MOSFET de Potência	IRFP048N	M
	Diodo Rápido	BYW 51	D

7.4.2. Conversor Bidirecional

A tabela 7.5 apresenta a listagem completa dos valores, especificações e quantidades, dos componentes utilizados na implementação do conversor bidirecional. A listagem da tabela 7.5 corresponde a uma das placas TZB2-DB. Foram confeccionadas um total de 3 placas.

Tabela 7.5. Relação de componentes do conversor bidirecional.

Componentes	Especificação	Quantidade	Legenda
Tiristor	TCA785	1	T
Transistor	BD875	2	Q1, Q2
Diodo	BAY61	6	D1 A D6
Diodo	1N4001	6	D7 A D12
Diodo-Zener	BZX 83 C20	2	Z1 E Z2
Capacitor 100pF/400V/CC, cerâmico		1	C1
Capacitor 47nF/250V/CC, cerâmico		1	CR
Capacitor 0.022µF/250V/CC, cerâmico		5	C2, C4, C5, C6, C7
Capacitor 10µF/250V/CC, cerâmico		1	C3
Transformador de pulsos T1, T2, T3, e T4 de V_{AC}	ZKB 418/079-02- PF	4	T1 A T4
Resistor 2.2kΩ	1/4W, cerâmico	7	R7, R9, R11, R12, R13, R14, R15
Resistor 10kΩ	1/4W, cerâmico	1	R2
Resistor 56kΩ	1/4W, cerâmico	1	R3
Resistor 22kΩ	1/4W, cerâmico	1	R8
Resistor 12kΩ	1/4W, cerâmico	2	R5, R6
Resistor 1.2MΩ	1/4W, cerâmico	1	R10
Resistor 4k7Ω	1/4W, cerâmico	1	R4
Resistor 27KΩ	1/4W, cerâmico	2	R1, R9.
Potenciômetro 10kΩ	1/4W	1	P3
Potenciômetro 100kΩ	1/4W	1	PR
Potenciômetro 4k7Ω	1/4W	1	P1

7.5. Principais Formas de Onda Obtidas na Experimentação

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos em laboratório com os conversores implementados durante os ensaios realizados. Serão analisadas as principais formas de onda para o projeto em questão.

7.5.1. Conversor Elevador *Boost* 1 - Célula PV

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para o conversor *boost* 1, que foi submetido aos testes, no laboratório.

A figura 7.11 apresenta a tensão na entrada e na saída do *boost* 1, respectivamente, para a tensão nominal da célula fotovoltaica que é 24V. Percebe-se a ação deste conversor que é regular a tensão de saída da célula fotovoltaica na tensão nominal do barramento CC em 48V.

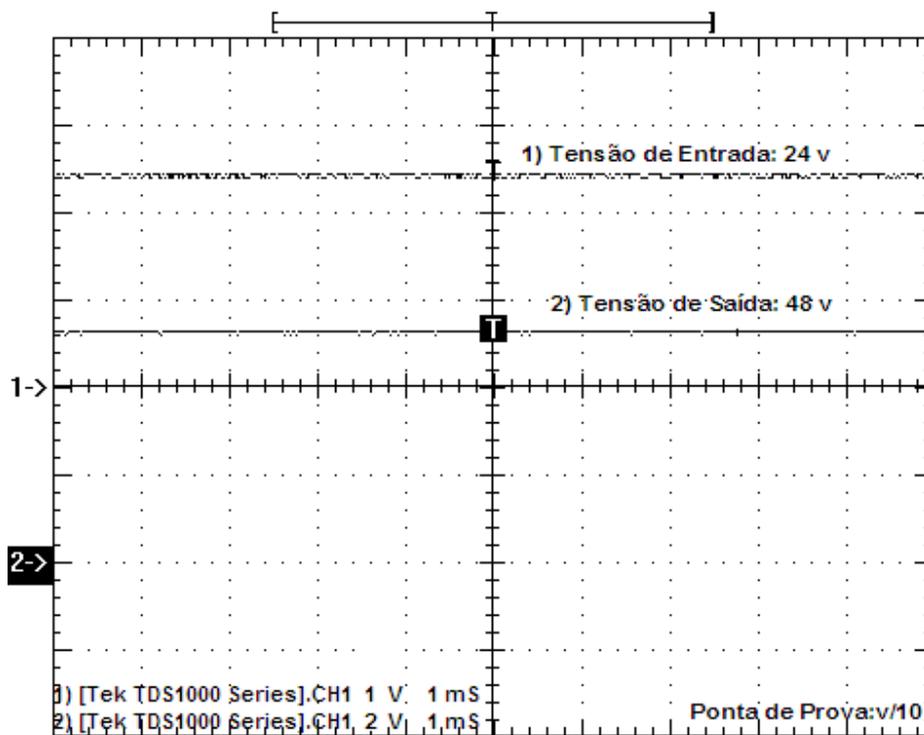


Figura 7.11. Tensão de entrada e de saída do conversor elevador *boost* 1- célula PV.

Comparando a figura 7.11 com a figura 6.6, confirmam-se os resultados obtidos pela simulação, para as tensões de entrada e saída para este conversor.

Na figura 7.12 observa-se o sinal de comando do *gate* do MOSFET de potência, fornecido pelo circuito de controle, para uma razão cíclica de 50%.

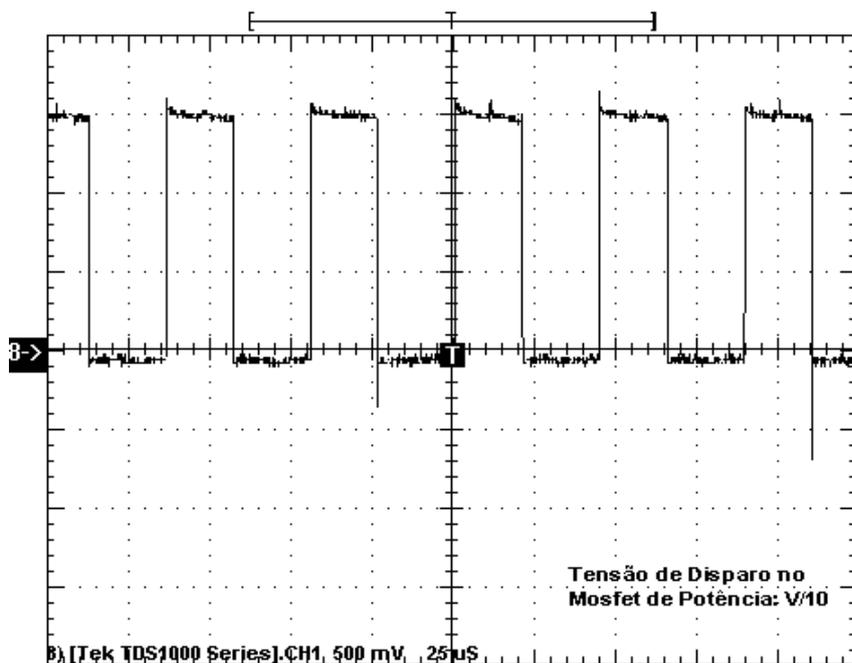


Figura 7.12. Tensão de controle no MOSFET de potência.

Na figura 7.13 têm-se a tensão sobre o filtro de entrada, representado pelo indutor. Observa-se nesta figura, as etapas de acumulação de energia no indutor (aumento da corrente) e a descarga do mesmo (decréscimo da corrente). A corrente foi amostrada com uma ponta de prova com a seguinte relação: 100 mV/A.

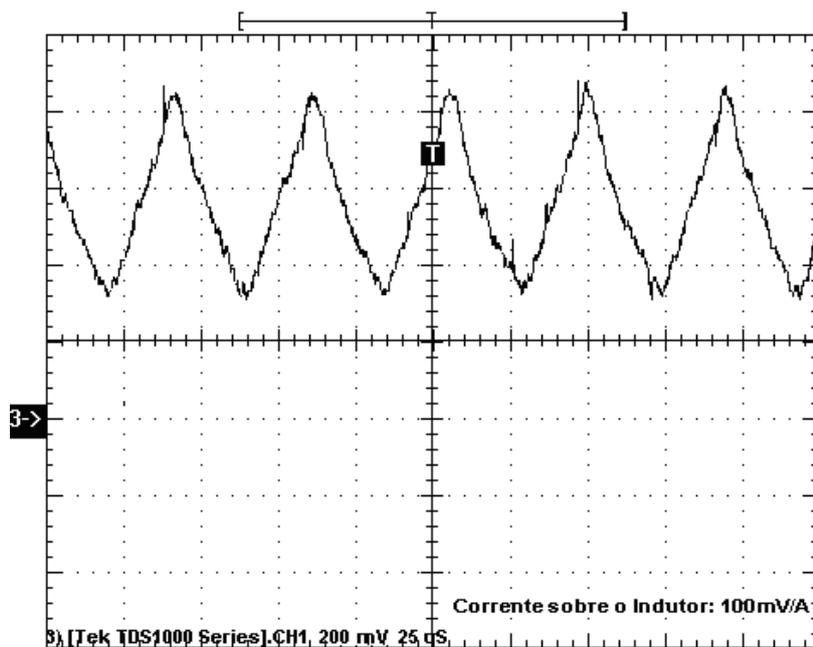


Figura 7.13. **Carga e descarga do indutor do conversor *boost*.**

Na comparação da curva experimental, ilustrada na figura 7.13, com a simulação, contida na figura 6.8, percebe-se a semelhança no processo de carga e descarga do indutor, entretanto há uma diferença importante no que diz respeito a amplitude máxima e mínima para os valores da corrente no indutor do conversor.

A explicação, para esta diferença, pode estar na construção do indutor, que foi feita de forma manual, podendo não ter ficado com as especificações determinadas no cálculo do projeto. Novamente é possível observar o ciclo de trabalho que o conversor *boost* está operando, que é de 50%, fazendo com que o circuito forneça na saída uma tensão duas vezes maior que a tensão presente na entrada.

7.5.2. Conversor Elevador Boost 2 - Banco de Baterias

A seguir pode-se observar os resultados obtidos com um ensaio de laboratório, onde foi construído um protótipo semelhante ao da célula fotovoltaica, e foram realizados diversos ensaios para obtenção dos resultados experimentais.

A figura 7.14 apresenta as tensões de entrada e saída, para o conversor *boost* 2 – banco de baterias.

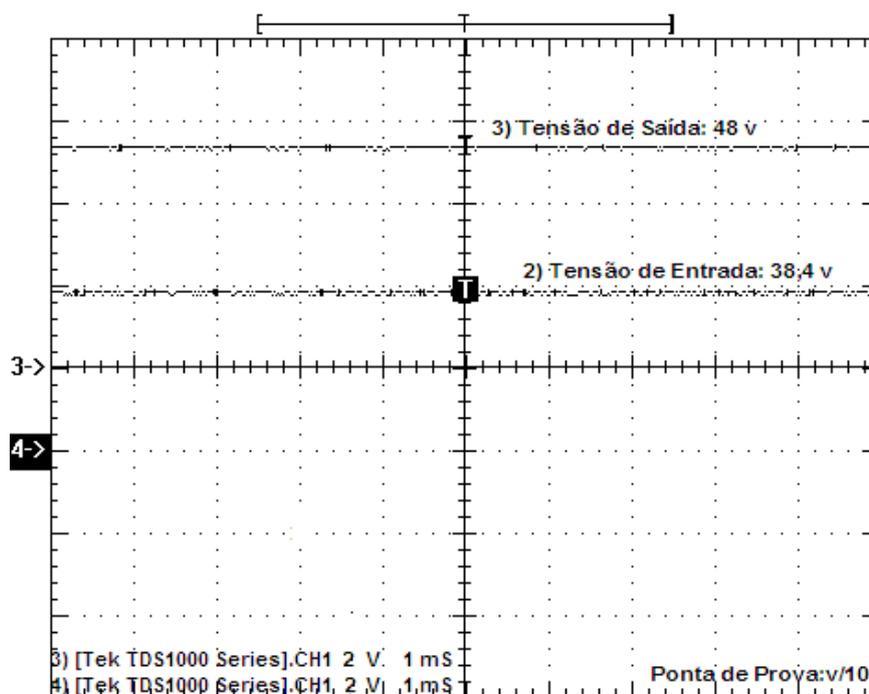


Figura 7.14. **Tensão de entrada e saída para o conversor *boost* 2 - banco de baterias.**

Comparando-se os dados experimentais, contidas na figura 7.15, com a curva de simulação da figura 6.12, confirma-se a ação desse circuito na regulação da tensão de entrada (38,4V), em uma tensão constante de 48V na saída, confirmando os resultados teóricos previstos nos cálculos feitos durante o dimensionamento.

7.5.3. Conversor Bidirecional

A fim de averiguar a validade das observações feitas nos capítulos anteriores, serão analisadas as variáveis tensão e corrente na saída e no controle, para diferentes tipos de cargas e ângulos de disparo, para verificar o funcionamento da estrutura, como retificador simples e como inversor.

(a) Atuação como Retificador

O conversor bidirecional atua no modo retificação quando a carga conectada aos seus terminais tem natureza resistiva ou indutiva para pequenos ângulos de disparo no controle. O ângulo de disparo obtido foi ajustado tal que a tensão de carga se igualasse a 48V. Em seguida foram capturadas as formas de onda da corrente e tensão na carga, resultando no gráfico da figura 7.15.

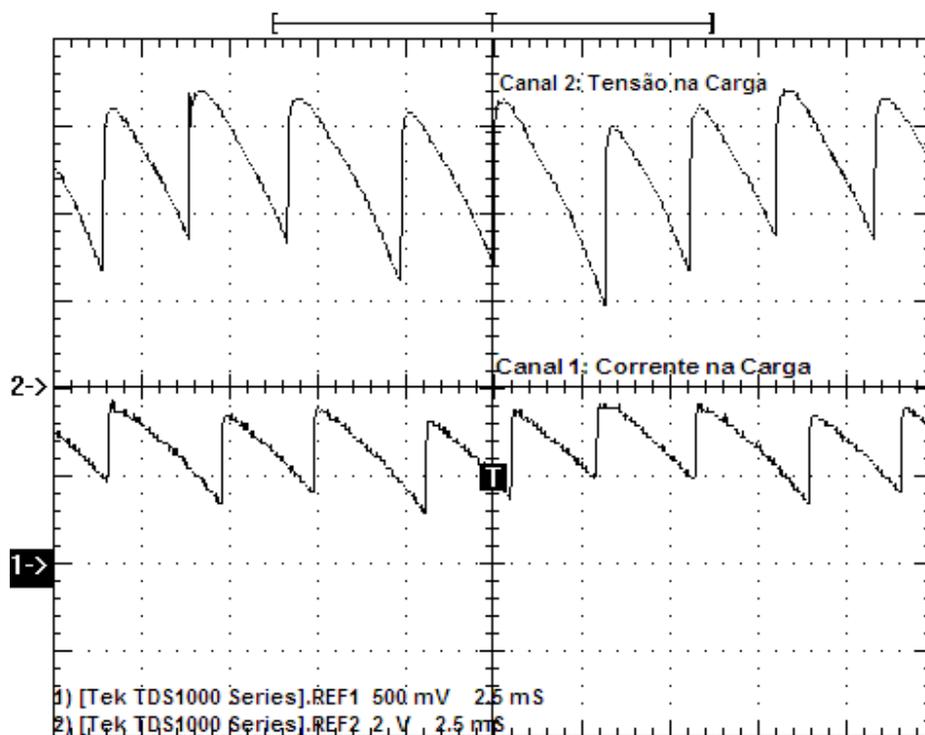


Figura 7.15. **Tensão e corrente de disparo para um ângulo de disparo próximo a 40°.**

Comparando-se os dados experimentais, apresentados na figura 7.15, com os dados de simulação da figura 6.14 encontra-se semelhança quanto ao formato das duas formas de onda. Não se consegue uma exatidão quanto aos valores nominais, pois nem sempre valores simulados convergem computacionalmente para uma curva.

A saída é procurar valores próximos que permitam a convergência computacional. Isto explica a diferença de valores das duas curvas. Quanto ao formato das curvas percebe-se claramente, nos dois casos, simulação e experimentação, que a estrutura está funcionando como retificador (tensão média na saída positiva).

Na experimentação foram empregadas 16 resistências de $0,5\Omega$ e 1kW cada, totalizando 8Ω e 16 kW. O sinal de corrente foi amostrado com uma ponta de prova com relação de 100mV/A e o sinal de tensão na carga com uma ponta de prova com um fator de atenuação de um fator de 10.

Percebe-se pelo gráfico que a corrente de carga oscilou em torno de 8A. O circuito funcionou durante 8 horas seguidas sem apresentar problemas.

Observa-se a semelhança dos formatos das formas de onda de corrente e tensão em virtude da natureza puramente resistiva da carga.

Na figura 7.16 observa-se a tensão de referência e o pulso de disparo para a saída representada pela figura 7.15, para a fase c da tensão trifásica de entrada.

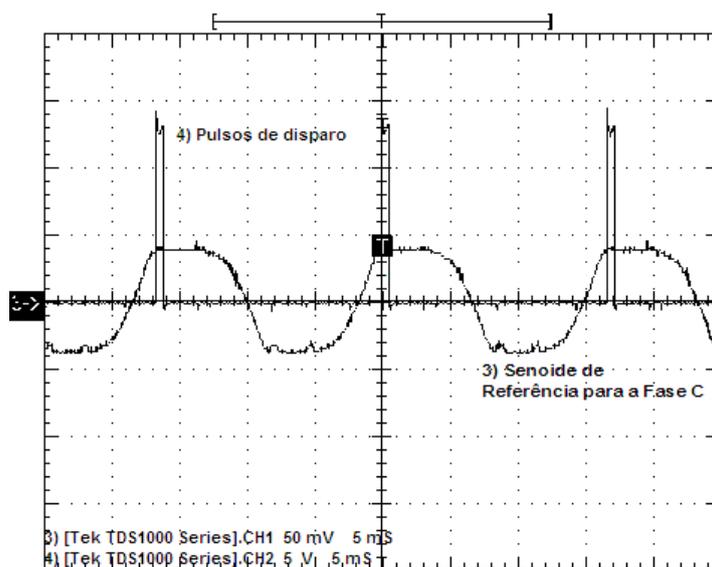


Figura 7.16 Tensão e corrente de disparo para um ângulo de 40° .
(b) Atuação como Inversor

Como foi abordado no estudo teórico do conversor, tratado no capítulo 4, este pode regenerar energia a partir da carga para a rede de alimentação, sob certas condições de funcionamento. Estas condições ocorrem para cargas de natureza fortemente indutiva.

Na figura 7.17 observa-se a saída do conversor para um ângulo de disparo maior que 90° que é o limiar da atuação entre retificador e inversor.

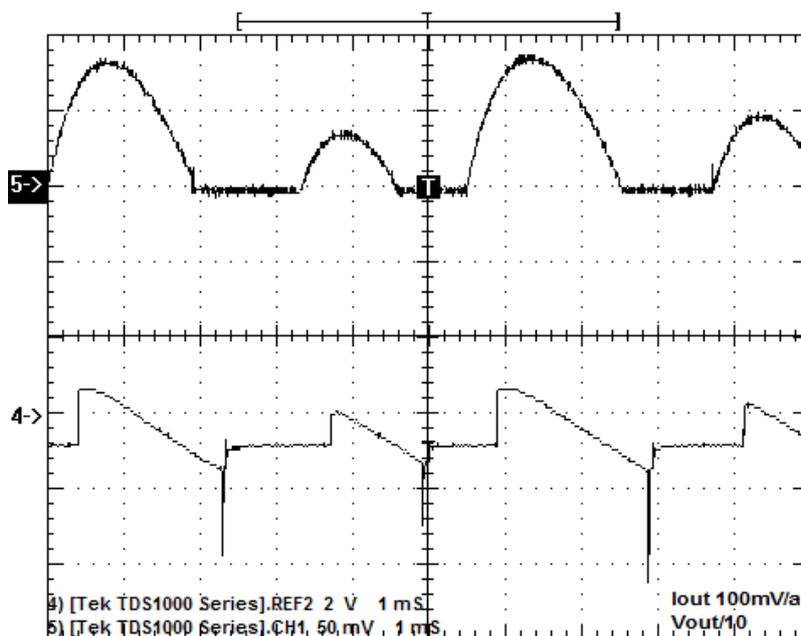


Figura 7.17. **Tensão e corrente de disparo na saída do conversor para funcionamento como inversor.**

Esta condição de o conversor atuar como retificador ou inversor, é identificada graficamente pela somatória líquida das áreas positiva e negativa do gráfico de tensão em função do tempo. No gráfico da figura 7.21 percebe-se a predominância da área negativa sobre a área positiva, configurando o funcionamento da estrutura como inversor.

As diferenças de formato entre os pulsos tanto na corrente como na tensão de saída vem da diferença entre as tensões de entrada, pela qualidade dos potenciômetros utilizados e pelo numero excessivo de fios conectados entre as placas que introduza ruídos eletromagnéticos e capacitâncias parasitas, tornando o circuito instável para ângulos de disparo grandes.

Para grandes ângulos de disparo o circuito fica instável, variando levemente a tensão de saída mesmo sem a variação do controle.

O indutor localizado na saída do conversor permite que o mesmo funcione no modo inversor, garantido uma tensão negativa na saída, porém sem a inversão do sentido da corrente.

Na figura 7.18 percebem-se os pulsos de disparo e as formas de onda auxiliares usadas pelo circuito de controle para determinar o ângulo de disparo.

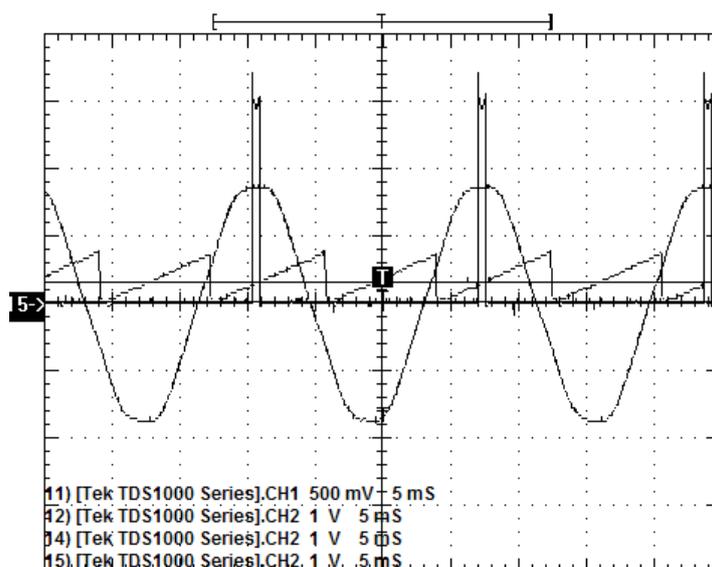


Figura 7.18. Sinais usados para o estabelecimento dos pulsos de disparo, para o ângulo de 90°.

Os resultados experimentais obtidos em laboratório comprovam, em grande parte, os dados obtidos com as simulações realizadas no capítulo 6.

7.6. Conclusão

Neste capítulo foram descritos os aspectos práticos da interligação dos estágios que compõem o sistema de geração simultânea de energia a partir de painéis fotovoltaicos, observadas e analisadas as formas de onda obtidas no laboratório e alguns detalhes construtivos do protótipo. Os resultados aqui apresentados vêm a confirmar toda a análise teórica realizada.

No decorrer deste capítulo foi desenvolvido o projeto do circuito de potência do conversor bidirecional proposto e foram mostrados os resultados experimentais obtidos. Montou-se em laboratório um protótipo de 10kW, apesar da potência processada o desempenho foi considerado satisfatório.

Após a realização dos ensaios, pode-se considerar que o protótipo possui as características de operação necessárias ao seu bom funcionamento, permitindo assim a sua utilização em futuros equipamentos comerciais. É pertinente lembrar que a área de energia

fotovoltaica apresenta um horizonte em franca expansão com novas idéias surgindo a cada momento.

Durante os ensaios realizados nos protótipos, diversos problemas foram detectados e soluções foram tentadas com o intuito de obter bons resultados. O principal problema enfrentado foi à contaminação, por ruídos, da senóide de referência usada para gerar os pulsos de disparo das placas de controle. Também foi verificado que as fases da tensão trifásica de alimentação não eram simétricas, existindo diferenças de amplitude entre elas. Esses fatores causavam, para alguns ângulos de disparo, distorção na tensão de saída do conversor bidirecional.

CONCLUSÕES

O escopo do sistema desenvolvido neste trabalho é o controle de potência para uma carga a partir de uma ponte retificadora trifásica, a tiristores, totalmente controlada. O sistema sob pesquisa no laboratório de eletrônica de potência da UFPA apresentou algumas restrições que devem ser melhoradas para implementação de um controle mais eficiente capaz, por exemplo, de fazer a realimentação de forma a estabilizar a tensão de saída para qualquer conjunto de cargas conectadas na saída.

As sugestões para trabalhos futuros seriam melhorias na parte de conexão entre as placas, e na introdução de malhas de controle digital para o conversor bidirecional, com a finalidade de automatizar o controle do valor de tensão presente na saída. O estudo da viabilidade econômica, do rendimento e da interferência gerada, também constitui-se em uma interessante linha de pesquisa a ser desenvolvida como continuação do presente trabalho.

O conhecimento adquirido com a realização deste trabalho permite que se faça uma avaliação do sistema e se tenha uma base mais consistente para determinar em que direção deverão ser concentrados os esforços na continuação dos estudos dos conversores e no aproveitamento da energia solar fotovoltaica.

O estudo de novas topologias bem como o emprego de técnicas de comutação suave deve ser levado em consideração com o objetivo de desenvolver conversores mais eficientes e adaptados às condições impostas pelos painéis fotovoltaicos, não esquecendo que o custo é um fator básico para a disseminação dos sistemas fotovoltaicos.

Outro caminho é o desenvolvimento de circuitos de perseguição do ponto de máxima potência (MPP) que tem sido abordado em diversos trabalhos nacionais e internacionais. Todavia as soluções encontradas que são mais eficientes são também as mais complexas e caras. O MMP permite que seja extraída a máxima potência de um determinado painel fotovoltaico. Caso os parâmetros variem, como por exemplo, a temperatura e/ou a insolação, o controle de MPP se adapta para extrair a máxima potência possível para as novas condições.

Atualmente algumas empresas concentram suas pesquisas nos chamados painéis CA. Os painéis CA são na verdade painéis fotovoltaicos com um inversor acoplado de forma que cada painel funciona como um pequeno gerador de energia elétrica enquanto houver energia solar

disponível. Podem ser conectados diretamente a uma tomada de energia elétrica e permanecerem conectados 24 horas por dia já que apresentam um consumo muito baixo na ausência de sol. A instalação destes módulos é simples, bastando fixá-los em qualquer telhado, fachada ou até mesmo janela, conectando-os à tomada mais próxima.

A tarefa de implantar estações de telecomunicações no interior da Região Amazônica é dificultada pela não disponibilidade de energia elétrica, nos lugares mais distantes. Neste caso antes da instalação dos equipamentos é necessário investir em fontes de energia para alimentar os equipamentos.

Os equipamentos de telecomunicações disponíveis no mercado não apresentam características que torne o seu emprego eficiente em localidades isoladas. Este trabalho tem o mérito de ter dado contribuições nessa área, ao estudar as particularidades existentes nessas regiões e propor uma fonte de alimentação para telecomunicações com suas características voltadas para este tipo de aplicação.

O estudo dos conversores de energia é importante para se fazer uma escolha adequada quando da fase de projeto na construção de fontes de energia. A comparação entre estruturas conversoras de energia permite avaliar características de desempenho e assim melhorar os projetos voltados para essas aplicações.

Com a importância que as energias renováveis ganham nos tempos atuais, existe uma demanda pela construção de fontes de energia que tenha como base a geração fotovoltaica, que é uma fonte de energia limpa renovável.

A operação silenciosa, sem emissão de gases ou resíduos poluentes, a baixa manutenção requerida aliada à facilidade de instalação, a possibilidade de perfeita integração com a instalação de telecomunicações de pequeno porte, sem necessidade de grande espaço extra, reduzindo os investimentos em transmissão de energia elétrica, são apenas algumas vantagens dos sistemas de geração simultânea proposto de pequeno porte.

Os EUA, Europa e Japão e muitos outros países estão concentrando esforços na pesquisa destas fontes de energia de forma que a produção mundial de componentes ligados à área fotovoltaica cresceu continuamente desde a década passada.

O domínio da tecnologia envolvida na geração direta de energia elétrica a partir do Sol tem importância estratégica para o Brasil, que apresenta regiões extremamente favoráveis ao aproveitamento da energia solar ao mesmo tempo em que apresenta uma carência de energia elétrica nestas regiões.

REFERÊNCIAS

- [1] – SILVA, Ennio. Possibilidades do uso de fontes renováveis de energia em Manaus. Revista Brasileira de Energia, v. 6, n.2, 1997. Disponível em: <http://www.sbpe.org.br>. Acesso em: 19 março. 2007
- [2] - GONÇALVES, C. Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica de Fontes Energéticas Para Alimentação de Estações Telefônicas. Manaus, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção). Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas.
- [3] – TELEMAR. Disponível em: <http://www.telemar.com.br>. Acesso em: 20 de julho de 2006.
- [4] – SOUZA, Rubem C. R. Energias alternativas: desafios e possibilidades para a Amazônia. Revista T & C Amazônia, Manaus, n.1, p. 74-80, fev. 2003. Disponível em: <http://portal.fucapi.br/tec>. Acesso em: 25 de março de 2007.
- [5] – CEAM. Disponível em: <http://www.ceam.gov.br>. Acesso em: 10 de julho de 2006.
- [6] - MANAUS ENERGIA. Disponível em: <http://www.manausenergia.gov.br/>. Acesso em: 10 de julho de 2006.
- [7] – COMITÊ COORDENADOR DO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS. Plano Decenal de Expansão – 2001/2010. Disponível em: <http://www.ccpe.gov.br>. Acesso em: 20 de março de 2007.
- [8] – O SOL - A NOSSA ESTRELA. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/esol.esol.htm>. Acesso em: 20 de março de 2007.
- [9] - CENBIO: Centro Nacional de Referência em Biomassa. Disponível em: <http://www.cenbio.org.br/>. Acesso em 15 de julho de 2006.
- [10] – IDER – Instituto de Desenvolvimento e Energias Renováveis. Disponível em: <http://www.ider.org.br/>. Acesso em 15 de junho de 2006.
- [11] - SILVA, A. Ferreira de BARRADAS, O. C. Machado. Telecomunicações: sistemas de energia. Rio de Janeiro: LTC, 1991.

- [12] – Barbi, Ivo. Eletrônica de potência. Florianópolis, 1998. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] – POMÍLIO, José Antenor. Eletrônica de Potência. Publicação FEEC, Fevereiro de 1998. São Paulo.
- [14] – TEXAS INSTRUMENTS, Data Sheet: UC 3524. Disponível em: <http://www.ti.com>. Acesso em: 20 de março de 2007.
- [15] – SIEMENS, Data Sheet: TCA 785. Disponível em: <http://www.siemens.com>. Acesso em: 20 de março de 2007.
- [16] – Barbi, Ivo. Conversores com comutação suave. Florianópolis, 1998. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [17] – DEMONTI, Rogers. Sistema de Co-Geração de Energia a partir de Painéis Fotovoltaicos. Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [18] – OLIVEIRA, Sérgio Vidal Garcia. Otimização de projeto de fontes de alimentação para centrais de telecomunicações. Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [19] – POMÍLIO, José Antenor. Conversores CC CC. Publicação FEEC, Fevereiro de 1998. São Paulo.
- [20] - Ashfaq, Ahned. Eletrônica de Potência. Publicação Pearson Prentice Hall, 2000. São Paulo.
- [21] – POMÍLIO, José Antenor. Teoria Básica dos Inversores de Tensão. Publicação FEEC, Fevereiro de 1998. São Paulo.
- [22] - COELHO, Kefas Damásio. Estudo de Uma Fonte Ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um Microcontrolador. Florianópolis, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [23] – TELECOMUNICAÇÕES DO AMAZONAS S.A. Histórico das telecomunicações no Estado do Amazonas. Manaus – AM. 1995.

[24] - CRESESB: Centro de Referência para energia solar e eólica. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/> Acesso em 20 de março de 2007.

[25] – ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 15 de julho de 2006.

[26] - Júnior, Petrônio Vieira, Palheta, Pedro Ivan, Denis, Marcelo Silva, Siqueira, José Gilson, Silva, Denis Marcelo, Nascimento, Miguel Pacheco, Filho, Pedro Ferreira, costa, Alex Ramos. Applied Digital Control for Localization of the Maximun Power of Photovoltaic Generator.

[27] – Barbi, Ivo. Como Construir Indutores. Florianópolis, 1998. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.