

Rômulo Schweitzer

**SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
EMPREGANDO BOMBA VIBRATÓRIA SUBMERSA
ALIMENTADA POR MEIO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Denizar Cruz
Martins

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schweitzer, Rômulo

SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA EMPREGANDO BOMBA
VIBRATÓRIA SUBMERSA ALIMENTADA POR MEIO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS / Rômulo Schweitzer ; orientador, Denizar
Cruz Martins - Florianópolis, SC, 2014.
179 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Bombeamento de água. 3.
Módulos fotovoltaicos. 4. Bomba vibratória submersa. 5.
Conversores estáticos de potência. I. Cruz Martins,
Denizar. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Rômulo Schweitzer

**SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA EMPREGANDO
BOMBA VIBRATÓRIA SUBMERSA ALIMENTADA POR MEIO
DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 23 de maio de 2014

Carlos Galup Montoro, Dr.

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Denizar Cruz Martins, Dr.

Orientador - Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Adriano Péres, Dr.

Fundação Universidade Regional de Blumenau

Eng. Márcio Silveira Ortmann, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Ao meu pai, por, nos últimos dias de sua vida, me permitir conhecê-lo plenamente.

AGRADECIMENTOS

Se eu tivesse que listar todas as situações que precisei de ajuda para concluir essa dissertação, certamente ela ganharia mais algumas páginas. Foram tantas dificuldades enfrentadas, mas nestas, recebi tanto apoio que certamente serei injusto ao listar as pessoas que fazem parte deste manuscrito.

Agradeço à minha família, minha mãe Dalzenha I. Schweitzer, meu pai Odair C. Schweitzer (*in memoriam*), meus irmãos Cleber e Thayane Schweitzer. O apoio e confiança que recebi durante os momentos de escolha sempre me deram confiança e tranquilidade para seguir meu caminho.

Agradeço ao meu afilhado Artur por simplesmente existir. Seu nascimento me deu força para acreditar num futuro feliz durante meu período de tristeza, luto e dificuldades.

Agradeço à minha namorada Manuela Alexandre pela paz que me traz, pelo amor que me dá e pelo apoio que recebo. Não consigo imaginar minha vida sem você, seu carinho tornou minhas tormentas mais calmas.

Agradeço ao professor Denizar C. Martins pela orientação acadêmica e apoio prestado. Sua competência, capacidade técnica e educação vão servir como um referencial durante minha vida profissional.

Agradeço ao professor Roberto F. Coelho, que mais que um mestre, tornou-se um amigo e referência. Sua perseverança é invejável. Nossas conversas, tanto técnicas quanto informais, nunca serão esquecidas.

Aos professores do INEP, Ivo Barbi, Ênio V. Kassick, Marcelo L. Heldwein, Arnaldo J. Perin, Samir Mussa, pelos ensinamentos durante as disciplinas de mestrado.

Agradeço os meus colegas de mestrado, André Andreta, Delvanei G. Bandeira Jr., Jefferson W. Zanotti, Marcos J. Jacobsoski, Rafael G. Faust, Rafael H. Eckstein e Rodrigo J. Piontkewicz. A amizade construída durante o período de créditos e o apoio recebido durante o último ano de estudo tornou o período mais leve e alegre.

Reconheço a amizade e reconheço o esforço do doutorando Eduardo Valmir de Souza. Toda a sua experiência, paciência e conhecimento a mim oferecida durante a construção e teste do protótipo me servirão de exemplo.

Agradeço à equipe técnica do INEP, Antônio Luiz S. Pacheco e Luiz Marcellus Coelho, pelo empenho, compreensão e troca de experiência durante as várias etapas de construção do protótipo.

Reconheço a importância e agradeço ao amigo Arthur Müller por sempre possuir palavras de tranquilizadoras e encorajadoras nos momentos mais difíceis de minha vida.

Agradeço aos colegas de laboratório, Walbermark Marques dos Santos, Márcio Silveira Ortmann, André Luiz Fuerback, que sempre se dispuseram a ajudar durante a construção do protótipo, testes em bancada e resolução de problemas.

Aos demais colaboradores do instituto, Diogo Duarte Luiz, Carina M. Floriano, pelo serviço prestado.

Finalmente, agradeço ao povo brasileiro, que com seu trabalho e impostos, permitiu o financiamento integral das pesquisas realizadas durante o desenvolvimento desta dissertação.

*“Não passamos de minhocas. Mas acredito ser
uma minhoca que brilha.”*

Winston Churchill

RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema de bombeamento de água de baixa potência, acionado por energia solar fotovoltaica para as regiões norte e nordeste do Brasil, não abastecidas pela rede pública de distribuição de energia elétrica. Para tanto, o sistema é composto por dois estágios, sendo o primeiro estágio elevador de tensão e o segundo inversor de tensão. No primeiro estágio, um conversor Boost Quadrático (QTN) é utilizado, processando energia do arranjo fotovoltaico, tendo como objetivo elevar e estabilizar a tensão no barramento cc. No estágio inversor é empregada a topologia em ponte completa, com modulação PWM senoidal de três níveis. Para controle da tensão, tanto do barramento cc quanto da bomba vibratória, são empregadas malhas de controle de tensão utilizando compensadores PI. Além disso, elabora-se dois sistemas simples capazes de testar a capacidade do arranjo fotovoltaico de gerar energia suficiente para alimentar a carga: um resistor capaz de se conectar e desconectar do barramento cc com potência similar ao da bomba vibratória e um limitador de ganho do conversor Boost QTN. Um protótipo é construído sendo acoplado a ele um controlador digital, onde as rotinas de controle, inicialização e desligamento do sistema são inseridos. Os resultados experimentais, utilizando módulos fotovoltaicos e uma bomba vibratória, comprovam o funcionamento satisfatório do conjunto operando de forma autônoma.

Palavras-chave: Bombeamento de água, módulos fotovoltaicos, bomba vibratória submersa, conversores estáticos de potência.

ABSTRACT

This thesis presents a low-power water pumping system driven by photovoltaic solar energy to the northern and northeastern regions of Brazil in which there is no public distribution of electricity services. The system is composed of two stages, the first works as a voltage elevator and the second as a inverter voltage. In the first stage, a Boost Quadratic converter (QTN) is used, processing the power from PV array, aiming to elevate and stabilize the voltage on the dc bus. For the inverter stage a full-bridge topology is employed, with three levels sinusoidal modulation. To control both, the dc bus voltage as the vibratory pump voltage, control loops using PI compensators are employed. In addition, two simple systems capable of testing the ability of the PV array to generate enough energy to supply the load are elaborated a resistor able to be connect and disconnect from the dc bus with a similar vibratory pump power and a limiter of the Boost converter QTN static gain. A prototype is built and an attached to it a digital controller is attached to it, where the control routines, initiation and shutdown of the system are inserted. The experimental results, using photovoltaic modules and a vibrating pump, validate the satisfactory operation of whole system, in autonomous operation.

Keywords: Water pumping, photovoltaic panels, vibratory pumping, static power converters.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Esboço do projeto proposto. | 34 |
| Figura 1.2: Trabalhos publicados sobre sistemas de bombeamento de água utilizando energia fotovoltaica..... | 36 |
| Figura 2.1: Ilustração de célula, módulo e arranjo fotovoltaico. | 42 |
| Figura 2.2: Modelo físico simplificado de uma célula fotovoltaica. | 43 |
| Figura 2.3: Circuito elétrico equivalente idealizado para células fotovoltaicas..... | 43 |
| Figura 2.4: Circuito elétrico equivalente com perdas da célula fotovoltaica..... | 44 |
| Figura 2.5: Representação alternativa do circuito elétrico da célula fotovoltaica..... | 44 |
| Figura 2.6: Associação em série de células fotovoltaicas idênticas. | 45 |
| Figura 2.7: Simplificação do circuito elétrico equivalente de células fotovoltaicas, sendo a o circuito em série e b o circuito simplificado... | 45 |
| Figura 2.8: Circuito equivalente simplificado da resultante da associação de células fotovoltaicas em série..... | 46 |
| Figura 2.9: Associação em paralelo de células fotovoltaicas. | 47 |
| Figura 2.10: Simplificação das células associadas em paralelo. | 48 |
| Figura 2.11: Circuito elétrico equivalente resultando da associação de células fotovoltaicas em paralelo. | 48 |
| Figura 2.12: Módulo fotovoltaico proveniente da associação mista de células..... | 49 |
| Figura 2.13: Circuito elétrico equivalente de associações série e paralelo de células fotovoltaicas. | 50 |
| Figura 2.14: Circuito elétrico equivalente do arranjo fotovoltaico..... | 51 |
| Figura 2.15: Relação entre tensão e corrente de um módulo genérico. . | 53 |
| Figura 2.16: Regiões de operação do módulo fotovoltaico. | 53 |
| Figura 2.17: Relação entre tensão e potência de um módulo genérico. | 54 |
| Figura 2.18: Influência da temperatura na tensão de saída do módulo fotovoltaico. | 55 |
| Figura 2.19: Influência da radiação solar na corrente de saída do módulo fotovoltaico. | 56 |
| Figura 2.20: Características externas de uma bomba vibratória..... | 57 |
| Figura 2.21: Bomba vibratória durante aspiração. | 58 |
| Figura 2.22: Bomba vibratória durante descarga. | 58 |
| Figura 2.23: Capacidade de vazão da bomba. | 58 |
| Figura 3.1: Conversor CC-CC Boost QTN [32]..... | 62 |
| Figura 3.2: Sequência de comando do conversor Boost QTN, sendo T o período de comutação..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.3: Boost QTN com perdas. | 64 |
| Figura 3.4: Ganho estático do conversor Boost QTN: ideal e com perdas. | 64 |
| Figura 3.5: Região de operação do conversor. | 65 |
| Figura 3.6: Modelo médio para grandes sinais do conversor Boost QTN. | 70 |
| Figura 3.7: Modelo médio de grandes sinais voltados a simulação. | 71 |
| Figura 3.8: Tensão V_{bar} , sendo a tensão “a” resultante da simulação do modelo comutado e “b” médio. | 71 |
| Figura 3.9: Corrente I_{pv} , sendo a corrente “a” resultante da simulação do modelo comutado e “b” médio. | 72 |
| Figura 3.10: Tensão e corrente de entrada do conversor Boost QTN. ... | 73 |
| Figura 3.11: Tensão e corrente no indutor L_1 | 73 |
| Figura 3.12: Tensão e corrente no indutor L_2 | 74 |
| Figura 3.13: Tensão no diodo D_1 e D_2 , respectivamente. | 74 |
| Figura 3.14: Tensão no semiconductor S_1 e S_2 , respectivamente. | 75 |
| Figura 3.15: Tensão e corrente de saída do conversor Boost QTN. | 75 |
| Figura 3.16: Tensão de entrada e de saída do conversor. | 76 |
| Figura 4.1: Inversor em ponte completa. | 77 |
| Figura 4.2: Modulação empregada. | 78 |
| Figura 4.3: Inversor em ponte completa com filtro LC de saída. | 79 |
| Figura 4.4: Modelo médio para grandes sinais do inversor de ponte completa. | 82 |
| Figura 4.5: Circuito utilizado para simulação do modelo médio de grandes sinais do conversor cc-ca. | 82 |
| Figura 4.6: Tensão de saída do modelo comutado (a) e médio (b). | 83 |
| Figura 4.7: Corrente de saída do modelo comutado (a) e médio (b). | 83 |
| Figura 4.8: Detalhes da tensão de saída do modelo comutado (a) e médio (b). | 84 |
| Figura 4.9: Detalhes da corrente de saída dos modelos comutado e médio. | 84 |
| Figura 4.10: Tensão aplicada aos componentes S_{3i} e S_{4i} | 85 |
| Figura 4.11: Tensão V_{ab} e corrente I_o | 85 |
| Figura 5.1: Tensão aplicada e a corrente drenada pela carga, obtidos experimentalmente. | 88 |
| Figura 5.2: Modelagem da carga. | 88 |
| Figura 5.3: Resultados de simulação da corrente da carga. | 89 |
| Figura 5.4: Curva simulada da tensão e corrente do arranjo fotovoltaico. | 90 |
| Figura 5.5: Malha para controle da tensão V_{bar} | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.6: Comportamento da tensão V_{bar} e da corrente I_{bar} em resposta ao degrau de carga..... | 92 |
| Figura 5.7: Degrau de tensão V_{pv} e tensão de saída V_{bar} | 93 |
| Figura 5.8: Representação da malha de controle da tensão V_o | 93 |
| Figura 5.9: Tensão de saída V_o controlada..... | 95 |
| Figura 5.10: Degrau de carga e sua influência na tensão V_o e na corrente I_o | 95 |
| Figura 5.11: Tensão e corrente nominais utilizando o modelo da bomba vibratória..... | 96 |
| Figura 5.12: Relação entre a tensão e a potência de um arranjo genérico..... | 97 |
| Figura 5.13: Regiões de operação possíveis..... | 98 |
| Figura 5.14: Visão geral do sistema..... | 100 |
| Figura 5.15: Rotinas de tomada de decisão..... | 101 |
| Figura 5.16: Vista geral do protótipo..... | 102 |
| Figura 5.17: Placa de potência..... | 103 |
| Figura 5.18: Placa de condicionamento e controle..... | 103 |
| Figura 5.19: Bomba vibratória utilizada para testes..... | 104 |
| Figura 5.20: Tensão e corrente de saída do conversor Boost QTN (simulada)..... | 105 |
| Figura 5.21: Tensão e corrente no conversor Boost QTN (resultados experimentais)..... | 105 |
| Figura 5.22: Comportamento da tensão e corrente com degrau de carga (simulação)..... | 106 |
| Figura 5.23: Comportamento da tensão e corrente com degrau de carga (resultados experimentais)..... | 106 |
| Figura 5.24: Curva de rendimento do conversor Boost QTN..... | 107 |
| Figura 5.25: Tensão e corrente de saída do estágio inversor alimentado carga resistiva (simulação)..... | 107 |
| Figura 5.26: Tensão e corrente de saída do conversor inversor alimentando a carga resistiva (resultados experimentais)..... | 108 |
| Figura 5.27: Tensão e corrente na bomba sendo alimentada pelo conversor (simulação)..... | 108 |
| Figura 5.28: Tensão e corrente aplicado na bomba pelo inversor (resultados experimentais)..... | 109 |
| Figura 5.29: Curva de rendimento do inversor..... | 109 |
| Figura 5.30: Tensão no arranjo fotovoltaico, barramento cc e na carga..... | 110 |
| Figura 5.31: Tensão no arranjo fotovoltaico, no barramento cc e na carga durante o acionamento do sistema fotovoltaico..... | 111 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.32: Tensão no arranjo, barramento cc e na carga durante acionamento do sistema com geração fotovoltaica insuficiente. | 112 |
| Figura 5.33: Tensão no arranjo, no barramento cc e na carga durante o desligamento do sistema. | 113 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|---|----|
| Tabela 2-1: Principais parâmetros resultantes da associação mista de células fotovoltaicas | 50 |
| Tabela 2-2: Parâmetros elétricos equivalentes do arranjo fotovoltaico. | 52 |
| Tabela 3-1: Tensão de entrada, saída e ganho estático requerido..... | 61 |
| Tabela 3-2: Especificações básicas para dimensionamento do conversor. | 66 |
| Tabela 3-3: Aspectos construtivos do indutor L_1 | 66 |
| Tabela 3-4: Aspectos construtivos do indutor L_2 | 67 |
| Tabela 3-5: Restrições do Capacitor C_1 | 67 |
| Tabela 3-6: Esforços de tensão e corrente no capacitor C_2 | 67 |
| Tabela 3-7: Esforços de tensão e corrente nos interruptores S_1 e S_2 | 68 |
| Tabela 3-8:Características do semicondutor S_1 e S_2 | 68 |
| Tabela 3-9: Esforços de tensão e corrente nos diodos D_1 e D_2 | 68 |
| Tabela 3-10: Características do semicondutor D_3 e D_4 | 69 |
| Tabela 3-11: Elementos parasitas associados aos componentes do conversor para temperatura de operação de 100 °C. | 69 |
| Tabela 4-1: Dimensionamento básico do conversor. | 80 |
| Tabela 4-2: Esforços de tensão e corrente nos semicondutores S_{1i} S_{2i} S_{3i} S_{4i} | 80 |
| Tabela 4-3: Principais características do semicondutor IRFB4229..... | 80 |
| Tabela 4-4: Dimensionamento do filtro de tensão LC | 81 |
| Tabela 4-5: Aspectos construtivos do indutor de filtro. | 81 |
| Tabela 4-6: Restrições do Capacitor C_f | 81 |
| Tabela 5-1:Caracterização da corrente drenada pela carga. | 88 |
| Tabela 5-2: Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico <i>Kyocera</i> KD 250GT. | 89 |
| Tabela 5-3: Parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico utilizado..... | 90 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| ABREVIATURAS | SIGNIFICADOS |
|------------------|--|
| AWG | Escala americana normalizada (<i>“American Wire Gauge”</i>) |
| ca | Corrente alternada |
| cc | Corrente contínua |
| DNOCS | Departamento Nacional de Obras Contra as Secas |
| MPP | Ponto de máxima potência (<i>“Maximum Power Point”</i>) |
| MPPT | Rastreadores de máxima potência (<i>“Maximum Power Point Tracker”</i>) |
| n_p | Quantidade de circuitos idênticos em questão conectados em paralelo |
| n_s | Quantidade de circuitos idênticos em questão conectados em série |
| ONGs | Organizações não governamentais |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| QTN | Quadrático três níveis |
| Prodeem | Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios |
| SNSA | Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental |
| STC | Condição padrão de teste (<i>“Standart Test Conditions”</i>) |
| T | Período de comutação do conversor Boost QTN |
| TCU | Tribunal de Contas da União |
| W/m ² | Medida de intensidade de radiação solar em Watts por metro quadrado |

LISTA DE SÍMBOLOS

| SIGLAS | SIGNIFICADO |
|-------------------|--|
| A | Unidade de corrente (Âmperes) |
| $C_b(s)$ | Compensador de conversor Boost QNT |
| $C_i(s)$ | Compensador de tensão V_o |
| C_f | Capacitor de filtro |
| C_1 | Capacitor 1 do conversor Boost QTN |
| C_2 | Capacitor 2 do conversor Boost QTN |
| D | Razão cíclica do conversor Boost QTN |
| $D_{arranjo}$ | Diodo intrínseco equivalente do arranjo fotovoltaico |
| D_{cel} | Diodo intrínseco do modelo da célula fotovoltaica |
| $D_{módulo}$ | Diodo intrínseco resultante da associação de células fotovoltaicas |
| D_1 | Diodo 1 do conversor Boost QTN |
| D_2 | Diodo 2 do conversor Boost QTN |
| F | Unidade de capacitância (Faraday) |
| $f_b(s)$ | Equação de transferência do filtro passa baixa do conversor Boost QTN |
| f_{fb} | Frequência de corte do filtro passa baixa |
| $f_i(s)$ | Filtro passa baixa da leitura de tensão V_o |
| G_B | Ganho estático do conversor Boost QTN |
| $G_b(s)$ | Equação de transferência do conversor inversor |
| $G_{BoostMax}(T)$ | Ganho máximo do conversor em função da temperatura do arranjo fotovoltaico |
| $G_i(s)$ | Função de transferência do conversor inversor |
| H | Unidade de indutância (Henry) |
| Hz | Unidade de frequência |
| $I_{arranjo}$ | Corrente de saída do arranjo fotovoltaico |
| I_{cel} | Corrente da célula fotovoltaica |
| $I_{Darranjo}$ | Corrente em $D_{arranjo}$ |
| I_{Dcel} | Corrente do diodo intrínseco do modelo da célula fotovoltaica |
| $I_{Dmódulo}$ | Corrente em $D_{módulo}$ |
| I_{mp} | Corrente de máxima potência do painel fotovoltaico |
| $I_{Pharranjo}$ | Corrente obtida através do efeito fotoelétrico no arranjo fotovoltaico |
| I_{Pcel} | Corrente obtida através de efeito fotoelétrico |

| | |
|------------------------|---|
| $I_{Ph\acute{m}odulo}$ | Corrente obtida através do efeito fotoelétrico na associação de células fotovoltaicas |
| I_o | Corrente senoidal de saída |
| I_{o1} | Componente fundamental da corrente senoidal de saída |
| $I_{RParranjo}$ | Corrente em $R_{Parranjo}$ |
| I_{RPcel} | Corrente na resistência R_{Pcel} |
| Junção pn | Polarização de metal puro através de dopagem |
| k_b | Ganho estático do compensador do conversor Boost QTN |
| k_i | Ganho estático do compensador de tensão V_o |
| k_{Vb} | Ganho do sensor de tensão do conversor Boost QTN |
| k_{Vi} | Ganho do sensor de tensão de V_o |
| L_f | Indutor de filtro |
| L_1 | Indutor 1 do conversor Boost QTN |
| L_2 | Indutor 2 do conversor Boost QTN |
| PMP | Ponto de Máxima Potência |
| R_{C1} | Resistência série-equivalente do capacitor C_1 |
| R_{C2} | Resistência série-equivalente do capacitor C_2 |
| R_{D1} | Resistência de condução do diodo D_1 |
| R_{D2} | Resistência de condução do diodo D_2 |
| $Ref_i(s)$ | Referência da tensão V_o |
| R_{L1} | Resistência parasita do indutor L_1 |
| R_{L2} | Resistência parasita do indutor L_2 |
| $R_{Parranjo}$ | Resistência paralelo equivalente do arranjo fotovoltaico |
| R_{Pcel} | Resistência paralela do modelo da célula fotovoltaica |
| $R_{Pm\acute{d}ulo}$ | Resistência paralela resultante da associação de células fotovoltaicas |
| R_o | Carga equivalente do conversor Boost QTN |
| $R_{Sarranjo}$ | Corrente série equivalente do arranjo fotovoltaico |
| R_{Scel} | Resistência série do modelo da célula fotovoltaica |
| $R_{Sm\acute{d}ulo}$ | Resistência série resultando da associação de células fotovoltaicas |
| R_{S1} | Resistência parasita do semiconductor S_1 |
| R_{S2} | Resistência parasita do semiconductor S_2 |
| S_1 | Radiação solar 1 |
| S_2 | Radiação solar 2 |
| S_3 | Radiação solar 3 |
| S_4 | Radiação solar 4 |

| | |
|--------------------|--|
| S_{1b} | Semicondutor comandado 1 do conversor Boost QTN |
| S_{1i} | Interrupor 1 do conversor inversor |
| S_{2b} | Semicondutor comandado 2 do conversor Boost QTN |
| S_{2i} | Interrupor 2 do conversor inversor |
| S_{3i} | Interrupor 3 do conversor inversor |
| S_{4i} | Interrupor 4 do conversor inversor |
| T_b | Constante de tempo do compensador do conversor Boost QTN |
| T_i | Constante de tempo do compensador de tensão V_o |
| T_{S1} | Período de condução de S_1 |
| T_{S2} | Período de condução de S_2 |
| T_1 | Temperatura 1 |
| T_2 | Temperatura 2 |
| T_3 | Temperatura 3 |
| T_4 | Temperatura 4 |
| V | Unidade de tensão (Volt) |
| VA | Unidade de potência aparente |
| V_{ab} | Tensão aplicada nos pontos a b do conversor |
| $V_{arranjo}$ | Tensão do arranjo fotovoltaico |
| V_{bar} | Tensão de saída do conversor Boost QTN |
| V_{ca} | Tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico |
| V_{cc} | Tensão de curto circuito do painel fotovoltaico |
| V_{cel} | Tensão da célula fotovoltaica |
| $V_{Darranjo}$ | Queda de tensão em $D_{arranjo}$ |
| V_{Dcel} | Queda de tensão do diodo intrínseco do modelo da célula fotovoltaica |
| V_{D1} | Tensão de condução do diodo D_1 |
| V_{D2} | Tensão de condução do diodo D_2 |
| $V_{módulo}$ | Tensão de saída do módulo fotovoltaico |
| V_{mp} | Tensão de máxima potência do painel fotovoltaico |
| $V_{mpp}(T)$ | Tensão de máxima potência em função da temperatura |
| $V_{mpp}(T_{ref})$ | Tensão de máxima potência na temperatura de referência |
| V_o | Tensão senoidal de saída |
| V_{o1} | Componente fundamental da tensão senoidal de saída |
| V_{pv} | Tensão na entrada do conversor Boost QTN |
| V_{Sen} | Onda portadora senoidal |
| V_{Tri1} | Onda triangular modulador 1 |
| V_{Tri2} | Onda triangular modulador 2 |
| W | Unidade de potência |

| | |
|--------------------------|---|
| $y_b(s)$ | Valor de saída da malha fechada |
| $y_i(s)$ | Sinal equivalente a tensão de saída V_o |
| α | Relação entre T_{S2} e T_{S1} |
| Ω | Unidade de resistência (Ohm) |
| $\langle v_{D1} \rangle$ | Fonte de tensão média do diodo D_1 |
| $\langle v_{D2} \rangle$ | Fonte de tensão média do diodo D_2 |
| $\langle i_L \rangle$ | Fonte de corrente do modelo médio do inversor |
| $\langle i_{S1} \rangle$ | Fonte de corrente média do interruptor S_1 |
| $\langle i_{S2} \rangle$ | Fonte de corrente média do interruptor S_2 |
| $\langle v_L \rangle$ | Fonte de tensão do modelo médio do inversor |
| $\mu_{V_{mpp}}$ | Coefficiente de temperatura da tensão de máxima potência. |
| ζ_{fb} | Fator de amortecimento do filtro passa baixa |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL | 31 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA | 31 |
| 1.2 SOLUÇÃO PROPOSTA | 33 |
| 1.2.1 <i>Fonte de energia</i> | 33 |
| 1.2.2 <i>Conversor estático de potência</i> | 33 |
| 1.2.3 <i>Bomba hidráulica</i> | 34 |
| 1.2.4 <i>Esboço da proposta</i> | 34 |
| 1.3 APLICAÇÕES..... | 35 |
| 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 35 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 38 |
| 1.6 CONCLUSÃO..... | 38 |
| 2 CONCEITOS GERAIS | 41 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 41 |
| 2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA..... | 41 |
| 2.2.1 <i>Efeito fotoelétrico</i> | 41 |
| 2.2.2 <i>Célula, módulo e painel fotovoltaico</i> | 42 |
| 2.2.2.1 <i>Célula fotovoltaica</i> | 42 |
| 2.2.2.2 <i>Módulo fotovoltaico</i> | 42 |
| 2.2.2.3 <i>Arranjo fotovoltaico</i> | 42 |
| 2.2.3 <i>Circuito equivalente da célula fotovoltaica</i> | 43 |
| 2.2.4 <i>Associações entre células fotovoltaicas</i> | 44 |
| 2.2.4.1 <i>Associação em série de células fotovoltaicas</i> | 44 |
| 2.2.4.2 <i>Associação em paralelo de células fotovoltaicas</i> | 47 |
| 2.2.4.3 <i>Associação mista de células fotovoltaicas</i> | 49 |
| 2.2.5 <i>Circuito elétrico equivalente do arranjo fotovoltaico</i> | 51 |
| 2.3 PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA | 52 |
| 2.4 INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA | 55 |
| 2.4.1 <i>Temperatura</i> | 55 |
| 2.4.2 <i>Radiação Solar</i> | 56 |
| 2.5 CONDIÇÃO PADRÃO DE TESTE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS..... | 56 |
| 2.6 BOMBA SUBMERSA VIBRATÓRIA | 56 |
| 2.7 CONCLUSÃO..... | 59 |
| 3 ESTÁGIO ELEVADOR DE TENSÃO | 61 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 61 |
| 3.2 CONVERSOR CC-CC BOOST QTN | 62 |
| 3.3 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DO CONVERSOR | 63 |
| 3.4 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR..... | 65 |
| 3.4.1 <i>Indutor L_1</i> | 66 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.2 | <i>Indutor L_2</i> | 66 |
| 3.4.3 | <i>Capacitor C_1</i> | 67 |
| 3.4.4 | <i>Capacitor C_2</i> | 67 |
| 3.4.5 | <i>Interruptores S_1 e S_2</i> | 68 |
| 3.4.6 | <i>Diodos D_1 e D_2</i> | 68 |
| 3.4.7 | <i>Elementos parasitas</i> | 69 |
| 3.5 | MODELO POR VALORES MÉDIOS DE GRANDES SINAIS..... | 69 |
| 3.6 | ESFORÇOS DE TENSÃO E DE CORRENTE NOS COMPONENTES..... | 72 |
| 3.7 | CONCLUSÃO..... | 76 |
| 4 | ESTÁGIO INVERSOR | 77 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO..... | 77 |
| 4.2 | CONVERSOR CC-CA MONOFÁSICO PWM..... | 77 |
| 4.3 | CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DO CONVERSOR..... | 78 |
| 4.4 | DIMENSIONAMENTO..... | 80 |
| 4.4.1 | <i>Semicondutores S_{1i} S_{2i} S_{3i} S_{4i}</i> | 80 |
| 4.4.2 | <i>Filtro de saída LC</i> | 81 |
| 4.4.2.1 | <i>Indutor L_f</i> | 81 |
| 4.4.2.2 | <i>Capacitor de filtro C_f</i> | 81 |
| 4.5 | MODELO POR VALORES MÉDIOS..... | 82 |
| 4.6 | TESTES PRELIMINARES DO INVERSOR..... | 84 |
| 4.7 | CONCLUSÃO..... | 85 |
| 5 | SIMULAÇÕES DO SISTEMA COMPLETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 87 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO..... | 87 |
| 5.2 | MODELAGEM DA CARGA..... | 87 |
| 5.3 | MODELAGEM DO ARRANJO FOTOVOLTAICO..... | 89 |
| 5.4 | ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA TENSÃO V_{BAR} | 90 |
| 5.4.1 | <i>Resultados de simulação do controle da tensão V_{bar}</i> | 92 |
| 5.5 | ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE TENSÃO V_o | 93 |
| 5.5.1 | <i>Resultados de simulação do controle da tensão V_o</i> | 94 |
| 5.6 | CIRCUITOS E SISTEMAS ADICIONAIS DO SISTEMA..... | 96 |
| 5.6.1 | <i>Limitação do ganho estático do conversor Boost QTN</i> | 96 |
| 5.6.2 | <i>Banco resistivo</i> | 99 |
| 5.6.3 | <i>Rotina de tomada de decisão do controlador</i> | 100 |
| 5.7 | PROTÓTIPO..... | 102 |
| 5.8 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS..... | 104 |
| 5.8.1 | <i>Tensão V_{bar}</i> | 104 |
| 5.8.2 | <i>Tensão V_o</i> | 107 |
| 5.8.3 | <i>Operação dos estágios em cascata</i> | 109 |
| 5.8.4 | <i>Inicialização do sistema</i> | 110 |
| 5.8.4.1 | <i>Inicialização com potência suficiente</i> | 110 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.8.4.2 | Inicialização com potência insuficiente..... | 111 |
| 5.8.4.3 | Desligamento por potência insuficiente | 113 |
| 5.9 | CONCLUSÃO..... | 113 |
| 6 | CONCLUSÃO GERAL E TRABALHOS FUTUROS..... | 115 |
| | REFERÊNCIAS..... | 117 |
| | APÊNDICE A | 123 |
| | APÊNDICE B..... | 135 |
| | APÊNDICE C | 145 |
| | APÊNDICE D | 147 |
| | APÊNDICE E..... | 157 |
| | APÊNDICE F..... | 163 |
| | APÊNDICE G | 165 |
| | APÊNDICE H | 167 |
| | APÊNDICE I..... | 169 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Apresentação do problema

Segundo considerações da Organização das Nações Unidas, a falta de acesso a boas condições sanitárias é fator decisivo para a saúde da população. A escassez de água, sua baixa qualidade e condições sanitárias inadequadas podem ser responsabilizadas pela morte diária de cinco mil crianças ao redor do planeta [1].

No Brasil, apesar de a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), órgão vinculado ao Ministério das Cidades, tratar a questão de assegurar acesso a água em quantidade e qualidade adequadas como um direito fundamental dos cidadãos, a abrangência das redes de distribuição de água chega a apenas 69,3% da população da região nordeste e 43% da região norte [2].

O semiárido brasileiro é caracterizado por baixos índices pluviométricos, de forma mal distribuída. Além disso, a proximidade com a linha do equador influencia as características climáticas: baixas latitudes impactam em temperatura média e número de horas de sol por ano elevados e índices acentuados de evapotranspiração [3].

Geologicamente, o nordeste é dividido em dois tipos estruturais: embasamento cristalino e bacias sedimentares. O embasamento cristalino é caracterizado por solos rasos, capacidade limitada de infiltração, escoamento superficial e pouca drenagem natural. Os aquíferos localizam-se de forma descontínua em fendas na rocha, com pouca quantidade de água armazenada e de baixa qualidade.

Os solos caracterizados como bacias sedimentares são geralmente profundos, possuem alta capacidade de infiltração, baixo escoamento superficial e boa drenagem natural. Esses atributos permitem suprimento de grande volume de água de qualidade. Infelizmente solos com essa característica estão alocados de forma esparsa no nordeste. Estima-se que 70% do volume de água no subsolo nordestino esteja localizado nas bacias do Piauí e Maranhão [3].

As primeiras ações do governo federal a fim de enfrentar a seca e combater seus efeitos datam dos primeiros anos do século XX. Estabeleceram-se três comissões: a) açudes e irrigação; b) estudos e obras contra os efeitos da seca; c) perfuração de poços. Dentre tais comissões, apenas a de açudes e irrigação prosperou, origem do atual Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). Hoje,

existem diversos departamentos, institutos e ONGs que buscam soluções aos problemas enfrentados naquela região.

As características de baixa capacidade de infiltração de água no solo combinado com alto escoamento superficial do embasamento cristalino possibilitou a construção de um grande número de açudes e barragens pelo DNOCS, tornando o semiárido brasileiro a maior reserva de água superficialmente acumulada em regiões semiáridas do mundo. São aproximadamente 30 bilhões de m³ de água. Esses reservatórios públicos de água destinam-se principalmente a irrigação e pecuária.

Planos governamentais com objetivo de dimensionar o potencial e fomentar o desenvolvimento de tecnologia de exploração dos lençóis freáticos na região nordeste existem desde a década de 70 [4], embora esbarrassem em questões decorrentes dos sistemas de bombeamento escolhidos e nas próprias características de comunidades isoladas. Essas questões baseavam-se em encontrar soluções viáveis para a fonte de energia, já que uma boa parcela das comunidades isoladas não possuía acesso à rede elétrica.

O censo 2002 revelou que aproximadamente 96% da população brasileira era abastecida por energia elétrica, mas de forma bastante irregular. Em algumas microrregiões do país, especialmente norte e nordeste, a cobertura desse serviço não alcançava 50% da população [5]. Várias políticas públicas foram criadas ao longo dos últimos anos com o intuito de universalizar a distribuição de energia, como o PRODEEN, Programa Luz da Terra, Programa Luz no Campo e Programa Luz para Todos. Embora avanços consideráveis tenham sido obtidos, ainda há obstáculos tecnológicos e financeiros impedindo a conexão de todas as residências à rede de distribuição de energia elétrica.

Segundo dados do TCU, até outubro de 2010 restavam ser feitas mais de 400 mil conexões, sendo que a maior parcela dessa demanda não atendida localiza-se em áreas remotas distante das redes convencionais, no norte e nordeste do país. Nesses locais, o fornecimento de energia a partir de geradores próprios, seja à diesel, solares ou eólicos, torna-se mais conveniente [5]. A elevação dos custos por unidade consumidora, associada aos entraves técnicos e regulatórios, impacta na necessidade de dilatação do prazo para que todos os domicílios sejam atendidos, problema reconhecido pela Eletrobras, que em audiência pública em 2010, admitia a inviabilidade do cumprimento do prazo estipulado para 2015 [6].

Os avanços na área de semicondutores, energias renováveis e microcontroladores obtidos nas últimas décadas poderiam trazer uma nova perspectiva para o enfrentamento dos períodos de seca na região

do semiárido brasileiro, principalmente nos pontos mais favoráveis ao bombeamento de água relativamente rasa (poços de até 40 metros de profundidade).

O desenvolvimento de sistemas isolados de bombeamento de água, tendo como prioridade a robustez, baixa manutenção, boa eficiência, operação e controle automático, além de utilizar fontes renováveis, tem potencial de amenizar as dificuldades enfrentadas pelas comunidades em que o fornecimento de energia ainda não foi realizado.

Como a robustez é uma característica importante nesse tipo de aplicação, devido a necessidade de instalação em locais de difícil acesso, longe de mão de obra especializada em eletrônica e também distante de fornecimento de peças e equipamentos, devem ser selecionados para estudo apenas conversores estáticos de potência conhecidos pela literatura, simples e de longa vida útil. É preciso que eles também sejam capazes de operar em adequação à fonte renovável selecionada.

É essencial que o compromisso com a simplicidade seja levado em consideração, tanto nos conversores, seus componentes e construção, quanto no método de controle de variáveis e de potência. A bomba hidráulica necessitará seguir as características do conjunto. Qualidades como acessibilidade, baixa manutenção, bom rendimento, instalação e operabilidade simples devem nortear a escolha do equipamento.

Nesse trabalho propõe-se um sistema para bombeamento de água a partir de módulos fotovoltaicos, como solução parcial aos problemas relacionados à falta de água no país.

1.2 Solução proposta

1.2.1 Fonte de energia

Uma das características marcantes do norte e nordeste do país, locais onde a demanda de sistemas de bombeamento de água é maior, é a alta incidência solar. A proximidade dessas regiões da linha do Equador faz com que haja disponibilidade de radiação solar abundante e distribuição homogênea durante todo o ano. Assim, a escolha de painéis fotovoltaicos como fontes de energia torna-se lógica e natural.

1.2.2 Conversor estático de potência

Considerando todos os pontos anteriormente apresentados, optou-se por utilizar dois conversores em cascata. O primeiro estágio, elevador de tensão, deve conectar-se ao painel fotovoltaico, elevar sua tensão e

manter o barramento CC controlado. Ele deve ser capaz de operar segundo as características de fornecimento de potência dos painéis fotovoltaicos, que se comporta como fontes não lineares de potência, apresentando curvas de tensão e corrente bastante particulares. Optou-se por utilizar o conversor Boost Quadrático de Três níveis (Boost QTN), pois devido à possibilidade de grande variação de tensão no painel de entrada, o conversor deve ser capaz de operar com uma ampla faixa de ganho estático.

O segundo estágio, inversor de tensão, deve ser capaz de fornecer energia à carga com as características necessárias para o funcionamento adequado. O conversor escolhido é um inversor de ponte completa convencional, com entrada em tensão e saída em corrente. A adição de filtro LC na saída possibilita obter a característica de saída em tensão, necessária para a alimentação da carga.

1.2.3 Bomba hidráulica

Os atributos procurados nesse dispositivo são encontrados nas bombas vibratórias, conhecidas também como “bomba sapo”. São amplamente utilizadas em poços e cisternas no Brasil e se popularizaram devido ao baixo custo, simplicidade e confiabilidade. Atualmente existem vários fabricantes em todo o território nacional produzindo bombas com características semelhantes.

1.2.4 Esboço da proposta

Depois de descrito o projeto, um esboço do projeto proposto é apresentado na Figura 1.1, onde pode ser visto o arranjo fotovoltaico, os estágios elevador e inversor de tensão e a bomba hidráulica.

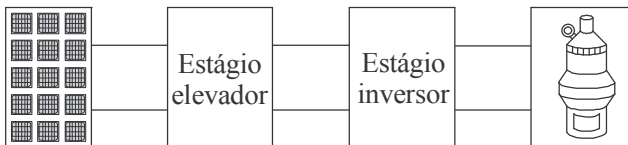


Figura 1.1: Esboço do projeto proposto.

1.3 Aplicações

O sistema foi desenvolvido visando solucionar um problema bem definido: bombeamento de água potável para famílias e comunidades carentes que estão longe da rede de distribuição convencional de energia elétrica. Entretanto, com o amadurecimento da proposta, novas possibilidades de aplicação foram encontradas, uma vez que embora os conversores tenham sido desenvolvidos para acionamento de uma bomba vibratória, podem ser conectadas a qualquer carga desde que observados os níveis máximos de potência. Algumas destas aplicações são:

- Fornecimento de água para animais em situação de pecuária extensiva;
- Irrigação agrícola;
- Alimentação de equipamentos elétricos em quiosques e vendedores ambulantes;
- Alimentação de equipamentos de serviços médicos e odontológicos itinerantes.
- Alimentação de refrigeradores pequenos para transporte de material para exames, medicamentos especiais e vacinas.

1.4 Revisão bibliográfica

O uso de painéis fotovoltaicos para bombeamento de água tem crescido nos últimos anos devido às suas interessantes características, como confiabilidade, modularidade, longa vida útil, facilidade de instalação, autonomia e baixa manutenção. Além disso, a não emissão de gases, ruídos ou rejeitos os torna uma fonte ambientalmente correta [7].

Observa-se na Figura 1.2 o volume de artigos submetidos e aprovados, agrupados em períodos de cinco anos, publicados no repositório *IEEEExplore*.

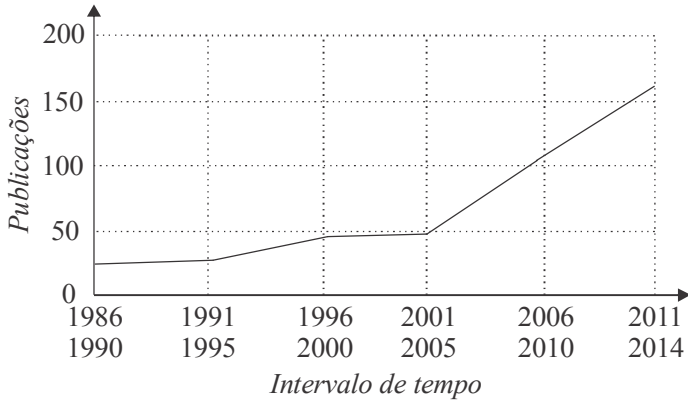


Figura 1.2: Trabalhos publicados sobre sistemas de bombeamento de água utilizando energia fotovoltaica.

Ressalta-se que as primeiras publicações sobre bombeamento de água empregando energia solar fotovoltaica utilizavam conversores bastante simples. Em [8] motores de indução eram utilizados e os conceitos de estágio elevador e estágio inversor estavam presentes. Para realizar o controle de velocidade do motor de indução a relação tensão/frequência foi preservada, mas o inversor trifásico foi acionado por meio de modulação simplificada, do tipo seis pulsos.

Motores de corrente contínua também foram empregados, como pode ser visto em [9] e [10]. Sistemas assim valem-se da capacidade de simplificação de projeto e utilização de apenas um estágio cc-cc, sem a necessidade de inversor.

Os motores de corrente contínua em sistema fotovoltaicos necessitavam de alta manutenção devido à presença do comutador e das escovas. Além disso, a constante queda no custo dos dispositivos semicondutores controlados, assim como o aumento da robustez, tornava o motor de indução uma boa escolha [11].

Embora os conceitos sobre ponto de operação de máxima potência dos painéis fotovoltaicos já fossem conhecidos, publicaram-se algumas aplicações sem a exploração desses conceitos. A simplicidade de conexão da fonte fotovoltaica diretamente ao motor ou a um conversor intermediário sem rastreamento era bastante comum. Em [12] apresentou-se dados atestando a elevação da eficiência do conjunto com a inserção de um conversor intermediário que acumulava a função de

elevador de tensão e também rastreador de máxima potência. Estes dados foram novamente confirmados em [13].

A possibilidade de utilizar equipamentos não convencionais capazes de produzir força mecânica para bombeamento de água também foi explorado. Os autores de [14] foram os primeiros a levantarem a possibilidade de utilização de motores lineares ou atuadores. Alguns projetos foram elaborados, mas sem a apresentação dos resultados de testes.

A capacidade de regular a frequência de operação do motor fornecia ao sistema a capacidade de controlar a potência drenada dos painéis fotovoltaicos, haja vista existir relação entre a potência consumida pelo motor e sua velocidade de rotação. A utilização dessa técnica popularizou-se, conforme explicita [15] e [16], que propuseram empregar um sistema rastreador de máxima potência para maximizar velocidade angular do motor para cada situação de radiação solar e temperatura do painel fotovoltaico.

Outra discussão importante, que consta nos projetos desenvolvidos para utilização em lugares remotos ou distantes de mão de obra especializada, é a viabilidade de uso de armazenadores de energia. Baterias são consideradas componentes que exigem manutenção, possuem vida útil curta e são evitadas. Dessa forma, os reservatórios de água podem ser vistos como armazenadores virtuais de energia [15]. Logicamente, os sistemas de bombeamento não funcionam sob demanda: quando em operação, bombeiam sob máxima capacidade, armazenando água em reservatórios.

Uma das características dos projetos publicados recentemente, que utilizam motores de indução, é o contraste que há entre a simplicidade e robustez buscada no motor e conversor e a complexidade de controle. Isso pode ser observado na escalada de sofisticação das publicações vistas em [17], [18], [19] e [20]. Complexidade esta justificável em aplicações envolvendo elevada potência e alta capacidade de bombeamento, mas difícil de justificar no caso de baixa potência (na faixa de até 2 kW) destinada ao fornecimento de água em pequena escala. Nesses casos, além de todas as características mencionadas, o baixo custo de implementação também deve ser considerado, observando-se requisitos como topologia do conversor, semicondutores empregados, capacidade computacional do sistema e tipo de bomba hidráulica.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado de modo que esta breve introdução representa o primeiro capítulo do manuscrito, o segundo capítulo discorre sobre os conceitos gerais necessários para o entendimento dos tópicos abordados, como efeito fotovoltaico, configuração de sistemas fotovoltaicos, rastreadores de máxima potência, etc., além da descrição do princípio de operação e funcionamento da bomba vibratória utilizada.

O terceiro capítulo aborda o estágio elevador de tensão, descrevendo os princípios de operação, características estáticas, modelagem de grandes e pequenos sinais, assim como simulações, voltadas à obtenção das formas de onda e dos esforços nos componentes.

O quarto capítulo tem foco no estágio inversor e está organizado de maneira similar ao terceiro capítulo. Será apresentada a modelagem do conversor, o dimensionamento básico de seus componentes passivos e ativos, além de resultados de simulação e formas de onda dos esforços nos componentes.

O quinto capítulo trata sobre simulações do sistema completo e resultados experimentais obtidos com o protótipo em testes de bancada. Para isso, apresenta-se a modelagem da carga e a estratégia de controle e operação desenvolvida do estágio elevador e inversor, além da apresentação da conexão de ambos em cascata. As soluções de programação para partida e saída de operação do conjunto serão também demonstradas e, ao fim, os resultados experimentais expostos.

Por fim, as conclusões sobre o trabalho, resultados obtidos e trabalhos futuros serão exibidos.

1.6 Conclusão

Este capítulo teve como objetivo explicitar os problemas que motivaram a proposta de tema da dissertação. A situação das famílias isoladas no nordeste do país ainda é preocupante por não serem abastecidas tanto por rede de energia elétrica quanto por água tratada.

Há um crescimento do interesse de pesquisadores no tema e as publicações científicas acerca desse assunto aumentam a cada ano, no entanto, é difícil afirmar que todas as possibilidades de estudo tenham se esgotado. Há uma série de detalhes técnicos ainda sem resposta. Este trabalho vem se somar a outros tantos, no sentido de contribuir de forma simples, robusta e de baixo custo na proposta de um sistema de

bombeamento eficiente, de bom desempenho e com reduzido impacto ao meio ambiente, de modo a amenizar as condições precárias de oferta de água que se encontram algumas comunidades isoladas do norte e nordeste brasileiro.

2 CONCEITOS GERAIS

2.1 Introdução

O desenvolvimento do projeto de bombeamento de água abrange vários conceitos, sendo que alguns deles não fazem parte do dia-a-dia de um possível leitor interessado no desenvolvimento de soluções para a problemática explanada. Portanto, esse capítulo abordará conceitos imprescindíveis para o entendimento desta dissertação: soluções propostas, metodologia de trabalho, etc.

A geração fotovoltaica será analisada com certa profundidade, desde os conceitos de célula fotovoltaica até o circuito elétrico equivalente de um arranjo fotovoltaico de tamanho qualquer. As características de não linearidade de módulos e seu comportamento frente à situações ambientais, como temperatura e radiação solar, e o conceito de máxima potência também serão abordados.

Por fim, o princípio de funcionamento da bomba hidráulica utilizada será explicado, pois apesar de comum no país, difere-se das bombas hidráulicas convencionais.

2.2 Energia fotovoltaica

2.2.1 Efeito fotoelétrico

O efeito fotovoltaico é o processo de obtenção direta de energia elétrica proveniente da energia irradiada pelo sol. De forma simplificada, o processo de obtenção de energia elétrica se dá quando fótons chocam-se aos elétrons da rede cristalina do silício, fornecendo-lhe energia. Se a energia do fóton incidente for igual ou superior a energia de banda proibida do semicondutor, os elétrons conseguirão alcançar a banda de condução, tornando-se livres. Caso exista um caminho fechado entre a célula fotovoltaica e uma carga qualquer, haverá circulação de corrente elétrica. O processo de excitação do material através da luz solar, bem como a forma com que o material semicondutor é tratado, é bastante conhecido e difundido na literatura [23].

2.2.2 Célula, módulo e painel fotovoltaico

2.2.2.1 Célula fotovoltaica

As células fotovoltaicas são a menor unidade de geração de energia solar. Elas são dispositivos capazes de converter energia solar incidente em energia elétrica. Tradicionalmente, medem entre 100 e 200 cm², sendo capazes de impor tensão de aproximadamente 0,6 V e potência entre 1 W e 3 W.

2.2.2.2 Módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são constituídos de ligações série e/ou paralelo entre células fotovoltaicas. Como o produto comercial fornecido pelos fabricantes é o módulo fotovoltaico, essas conexões não são passíveis de serem alteradas pelo usuário.

2.2.2.3 Arranjo fotovoltaico

Com o objetivo de alcançar níveis significativos de tensão, corrente e potência condizentes com a aplicação proposta, módulos fotovoltaicos são, por sua vez, conectados em série e/ou paralelo, dando assim, origem à arranjos ou painéis fotovoltaicos, como visto na Figura 2.1.

Desta forma, é possível obter arranjos que partem das dezenas de watts até configurações da ordem de megawatts.

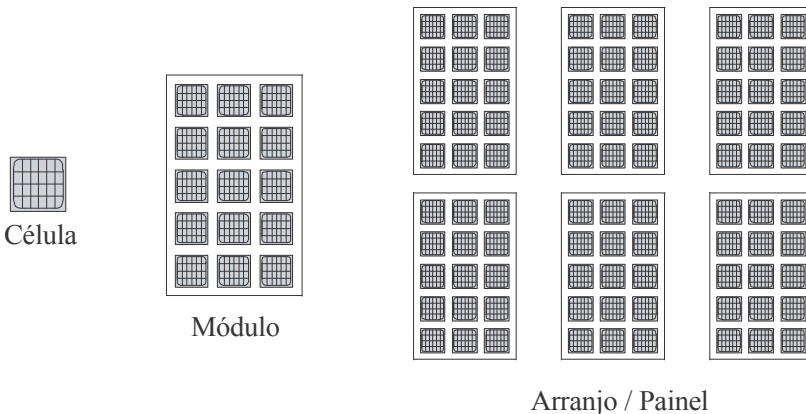


Figura 2.1: Ilustração de célula, módulo e arranjo fotovoltaico.

2.2.3 Circuito equivalente da célula fotovoltaica

De maneira simplificada, uma célula fotovoltaica pode ser considerada uma junção pn que ao ser exposta à luz gera corrente elétrica, como ilustrado na Figura 2.2.

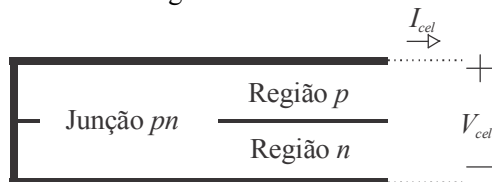


Figura 2.2: Modelo físico simplificado de uma célula fotovoltaica.

Sendo assim, o circuito elétrico mais simples capaz de reproduzir essas características é apresentado na Figura 2.3.

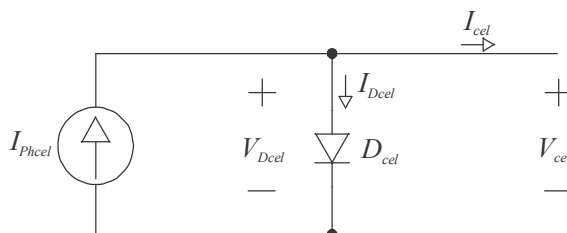


Figura 2.3: Circuito elétrico equivalente idealizado para células fotovoltaicas.

Como as duas representações (física e elétrica) referem-se ao mesmo dispositivo, existe forte correlação entre elas. A corrente gerada pela interação fóton-elétron na Figura 2.2 é representada como uma fonte de corrente constante I_{phcel} na Figura 2.3. A junção pn , característica do silício extrínseco na representação física, é modelada como um diodo D_{cel} de junção pn no circuito elétrico. As grandezas I_{cel} e V_{cel} representam corrente e tensão de saída da célula fotovoltaica, enquanto $I_{D_{cel}}$ e $V_{D_{cel}}$ referem-se à corrente e à tensão aplicada ao diodo D_{cel} [21][22][23].

Observa-se, entretanto, que o circuito elétrico retratado na Figura 2.3 não contempla os parâmetros associados à célula fotovoltaica real. A inclusão dos parâmetros de perda implica na Figura 2.4, em que a resistência paralela $R_{P_{cel}}$ representa as perdas internas ou por correntes de fuga, enquanto a resistência série $R_{S_{cel}}$ desempenha o papel de representar as perdas causadas devido às quedas de tensão nos contatos metálicos.

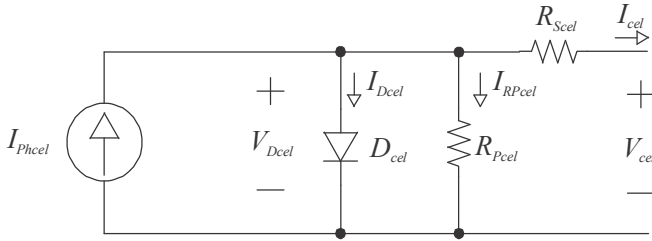


Figura 2.4: Circuito elétrico equivalente com perdas da célula fotovoltaica.

Alternativamente, o circuito elétrico da Figura 2.4 pode ser representado conforme o ilustrado na Figura 2.5. Esta representação, mesmo sendo eletricamente equivalente a anterior, facilita a obtenção do circuito elétrico equivalente referente ao módulo fotovoltaico.

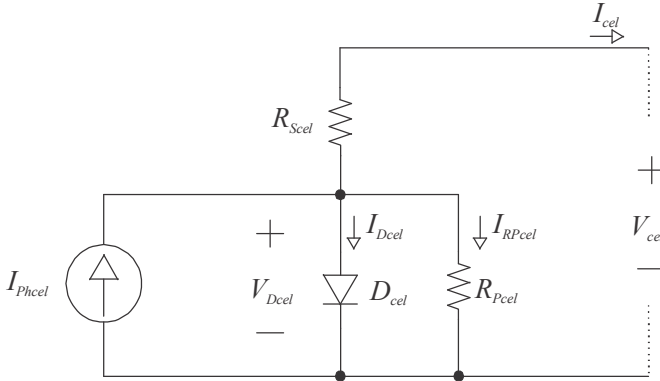


Figura 2.5: Representação alternativa do circuito elétrico da célula fotovoltaica.

2.2.4 Associações entre células fotovoltaicas

A obtenção do circuito equivalente do módulo fotovoltaico nada mais é que associações adequadas do modelo da célula fotovoltaica. Módulos fotovoltaicos são associações em série, em paralelo e/ou mistas de células fotovoltaicas.

2.2.4.1 Associação em série de células fotovoltaicas

A Figura 2.6 representa o ponto de partida para a análise, onde n_s células fotovoltaicas idênticas estão ligadas em série. De modo a simplificar a análise, algumas alterações foram propostas na Figura 2.7, mantendo as características elétricas do circuito original.

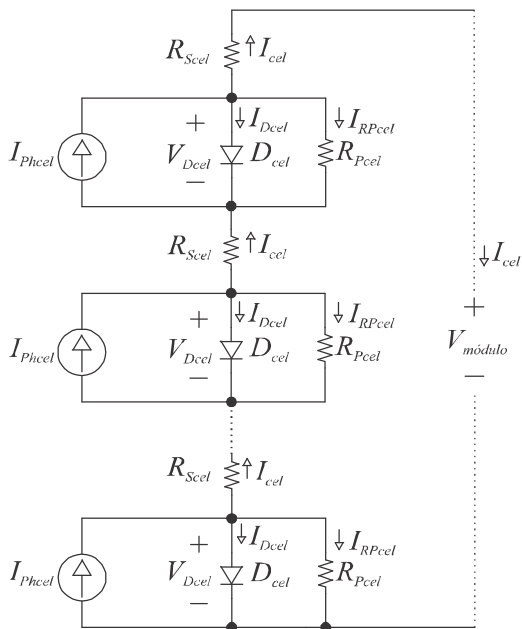


Figura 2.6: Associação em série de células fotovoltaicas idênticas.

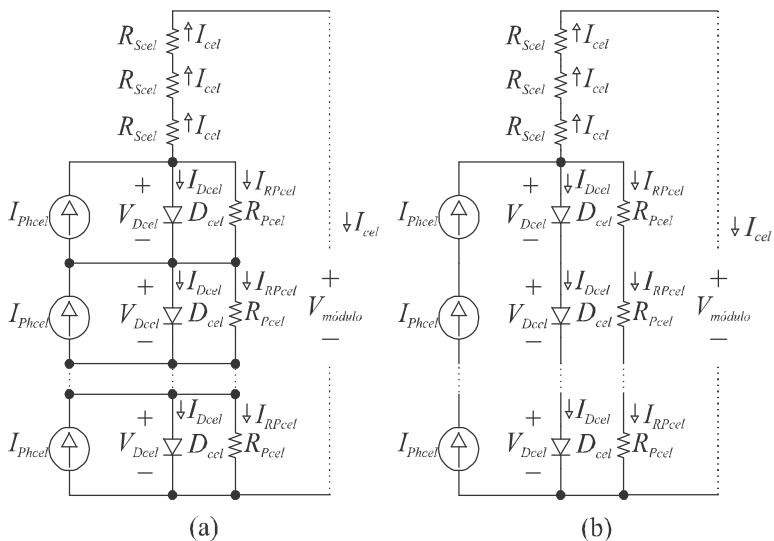


Figura 2.7: Simplificação do circuito elétrico equivalente de células fotovoltaicas, sendo a o circuito em série e b o circuito simplificado.

A partir da análise da Figura 2.7 chega-se a conclusão que ambos os parâmetros de perdas R_{Pcel} e R_{Scel} de cada célula estão em série, sendo possível reuni-los em um resistor equivalente. O mesmo vale para as fontes de corrente e diodos, permitindo reduzir o circuito equivalente à forma apresentada na Figura 2.8.

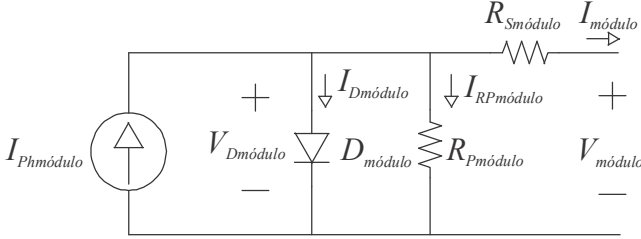


Figura 2.8: Circuito equivalente simplificado da resultante da associação de células fotovoltaicas em série.

A partir da análise das figuras, algumas relações entre as grandezas elétricas podem ser obtidas:

$$I_{Phmódulo} = I_{Pcel} \quad (2.1)$$

$$I_{módulo} = I_{cel} \quad (2.2)$$

$$V_{Dmódulo} = n_s V_{Dcel} \quad (2.3)$$

É possível associar os parâmetros de perdas das células fotovoltaicas:

$$R_{Pmódulo} = n_s R_{Pcel} \quad (2.4)$$

$$R_{Smódulo} = n_s R_{Scel} \quad (2.5)$$

O equacionamento da Figura 2.8 em função da tensão da saída pode ser expresso por:

$$V_{módulo} = V_{Dmódulo} - R_{Smódulo} I_{módulo} \quad (2.6)$$

Substituindo (2.3), (2.5) e (2.2) na equação (2.6), obtêm-se:

$$V_{módulo} = n_s V_{Dcel} - n_s R_{Smódulo} I_{cel} \quad (2.7)$$

$$V_{módulo} = n_s (V_{Dcel} - R_{Smódulo} I_{cel}) \quad (2.8)$$

Analisando o circuito elétrico da Figura 2.4, conclui-se que:

$$V_{cel} = V_{Dcel} - R_{cel} I_{cel} \quad (2.9)$$

Pode-se, enfim, então substituir a equação (2.9) em (2.8), de onde a seguinte equação é obtida:

$$V_{módulo} = n_s V_{cel} \quad (2.10)$$

2.2.4.2 Associação em paralelo de células fotovoltaicas

Considera-se n_p células fotovoltaicas idênticas conectadas em paralelo, conforme Figura 2.9.

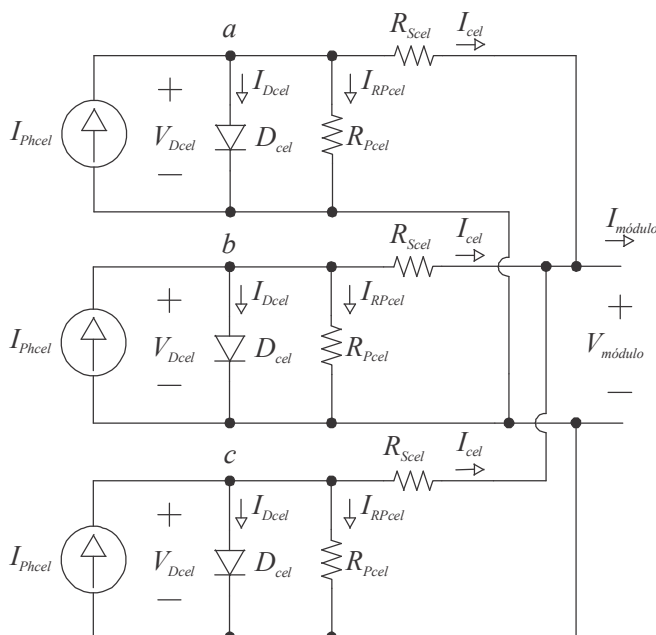


Figura 2.9: Associação em paralelo de células fotovoltaicas.

Por serem células idênticas, por definição, considera-se possível conectar os pontos a, b e c entre si, conforme destacado na Figura 2.10.

A análise da Figura 2.10, resultante da associação em paralelo, evidencia que as fontes de corrente I_{phcel} , os diodos D_{cel} e as resistências $R_{P_{cel}}$ estão também em paralelo.

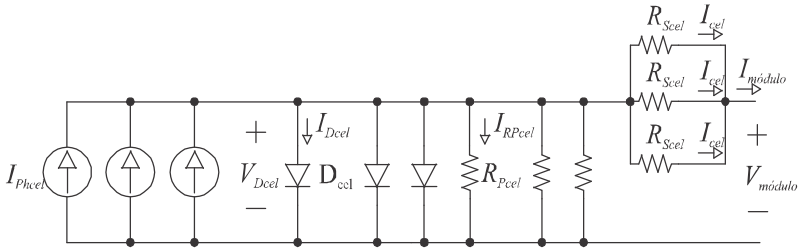


Figura 2.10: Simplificação das células associadas em paralelo.

Por fim, agrupando tais componentes em um único equivalente, determina-se o circuito elétrico compacto final.

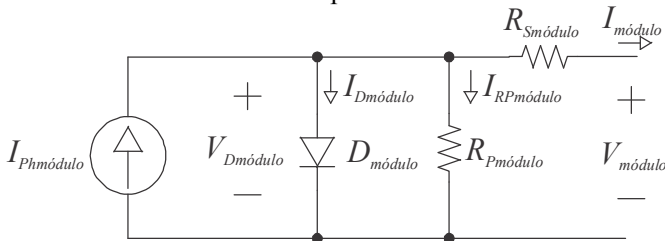


Figura 2.11: Circuito elétrico equivalente resultando da associação de células fotovoltaicas em paralelo.

A partir da análise da Figura 2.11 é possível obter as relações entre as grandezas elétricas, similarmente ao realizado no item anterior.

$$I_{Phmódulo} = n_p I_{Phcel} \quad (2.11)$$

$$I_{módulo} = n_p I_{cel} \quad (2.12)$$

$$V_{Dmódulo} = V_{Dcel} \quad (2.13)$$

É possível estabelecer as seguintes relações entre os parâmetros de perdas:

$$R_{Pmódulo} = \frac{R_{Pcel}}{n_p} \quad (2.14)$$

$$R_{Smódulo} = \frac{R_{Scel}}{n_p} \quad (2.15)$$

Equacionando o circuito da Figura 2.11, deixando em destaque a tensão de saída $V_{módulo}$ em (2.16):

$$V_{\text{módulo}} = V_{D\text{módulo}} - R_{S\text{módulo}} I_{\text{módulo}} \quad (2.16)$$

A partir de (2.16) é possível substituir as equações (2.13), (2.15) e (2.12) em (2.16), obtendo-se:

$$V_{\text{módulo}} = V_{D\text{cel}} - \frac{R_{S\text{cel}}}{n_p} I_{\text{cel}} \quad (2.17)$$

$$V_{\text{módulo}} = V_{D\text{cel}} - R_{S\text{cel}} I_{\text{cel}} \quad (2.18)$$

Conclui-se, por fim, que:

$$V_{\text{módulo}} = V_{\text{cel}} \quad (2.19)$$

2.2.4.3 Associação mista de células fotovoltaicas

A associação mista série/paralelo é a solução industrial empregada para elevar simultaneamente os níveis de tensão e corrente em módulos fotovoltaicos.

Um conjunto de células conectadas em série, denominado “strings”, é interligada a outros conjuntos semelhantes, conectados em paralelo, como pode ser visto na Figura 2.12.

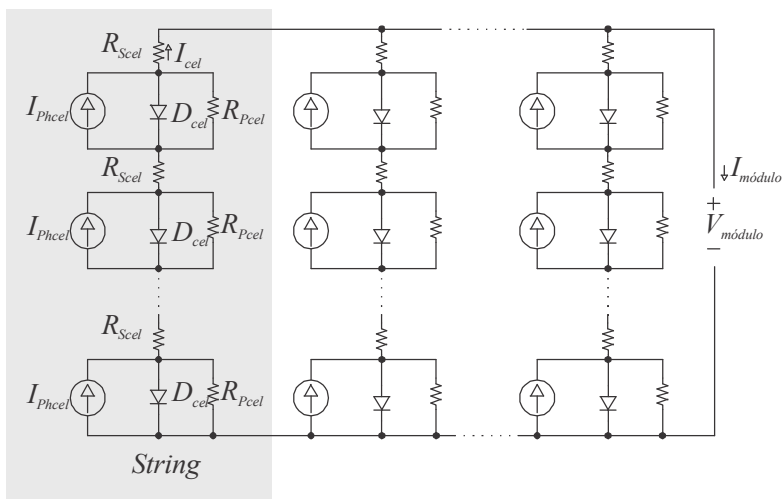


Figura 2.12: Módulo fotovoltaico proveniente da associação mista de células.

Aplicando as teorias de simplificação de circuitos desenvolvidas nos itens anteriores, obtém-se o circuito elétrico equivalente da Figura 2.13:

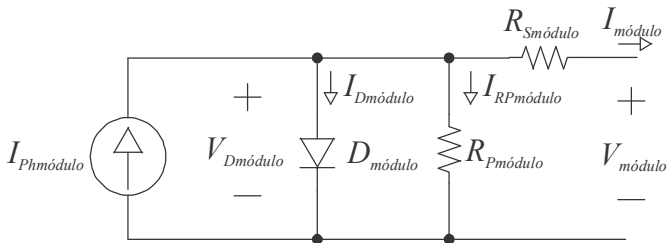


Figura 2.13: Circuito elétrico equivalente de associações série e paralelo de células fotovoltaicas.

A Tabela 2-1 reúne os principais parâmetros do módulo fotovoltaico relativo à associação de células fotovoltaicas.

Tabela 2-1: Principais parâmetros resultantes da associação mista de células fotovoltaicas

| | Célula | Módulo |
|----------------------|------------|--|
| Células em paralelo | 1 | n_p |
| Células em série | 1 | n_s |
| Resistência série | R_{Scel} | $R_{Smódulo} = \frac{n_s}{n_p} R_{Pcel}$ |
| Resistência paralela | R_{Pcel} | $R_{Pmódulo} = \frac{n_s}{n_p} R_{Pcel}$ |
| Corrente gerada | I_{Pcel} | $I_{Phmódulo} = n_s I_{Pcel}$ |
| Tensão de saída | V_{cel} | $V_{módulo} = n_s V_{cel}$ |
| Corrente de saída | I_{cel} | $I_{módulo} = n_s I_{Pcel}$ |

2.2.5 Circuito elétrico equivalente do arranjo fotovoltaico

Assim como o circuito elétrico equivalente dos módulos fotovoltaicos são resultados de associações entre células fotovoltaicas, o circuito elétrico equivalente de arranjos fotovoltaicos são resultados de associações entre módulos, sendo as ligações do tipo série, paralela ou mista [24].

Existe grande similaridade entre os circuitos equivalentes de células e módulos fotovoltaicos, diferenciando-os apenas pela ordem de grandeza dos parâmetros elétricos.

Desta forma, independentemente da conexão entre os módulos, o circuito elétrico resultante sempre será o mesmo, exibido na Figura 2.14.

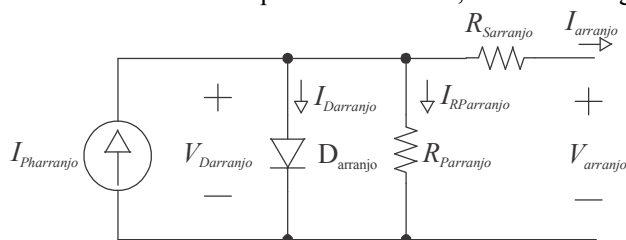


Figura 2.14: Circuito elétrico equivalente do arranjo fotovoltaico.

Utilizando-se dos parâmetros do módulo fotovoltaico como referência ($R_{Smódulo}$, $R_{Pmódulo}$, $I_{Phmódulo}$, $V_{módulo}$ e $I_{módulo}$) e considerando que o arranjo é constituído de N_s módulos em série e N_p módulos em paralelo, é possível expressar os parâmetros que compõem o arranjo fotovoltaico tal como propõe a Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Parâmetros elétricos equivalentes do arranjo fotovoltaico.

| Parâmetro | Arranjo fotovoltaico | | |
|---|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | Conexão série | Conexão paralela | Conexão mista |
| Módulos em paralelo | 0 | N_p | N_p |
| Módulos em série | N_s | 0 | N_s |
| Resistência série ($R_{sarranjo}$) | $N_s R_{Smódulo}$ | $\frac{R_{Smódulo}}{N_p}$ | $\frac{N_s}{N_p} R_{Smódulo}$ |
| Resistência paralelo ($R_{parranjo}$) | $N_s R_{Pmódulo}$ | $\frac{R_{Pmódulo}}{N_p}$ | $\frac{N_s}{N_p} R_{Pmódulo}$ |
| Corrente foto-gerada ($I_{Pharranjo}$) | $I_{Phmódulo}$ | $N_p I_{Phmódulo}$ | $N_p I_{Phmódulo}$ |
| Tensão de saída ($V_{arranjo}$) | $N_s V_{módulo}$ | $V_{módulo}$ | $N_s V_{módulo}$ |
| Corrente de saída ($I_{arranjo}$) | $I_{módulo}$ | $N_p I_{módulo}$ | $N_p I_{módulo}$ |

2.3 Ponto de máxima potência

Módulos fotovoltaicos são capazes de transformar radiação solar diretamente em energia elétrica. Conforme já mencionado, são fontes de energia que operam de forma silenciosa, estática, não emitem gases e dispensam qualquer forma de combustível ou material de reação.

Entretanto, possuem características bastante peculiares: são fontes de energia com características de tensão e corrente altamente não lineares e com limitações de tensão e potência de saída. Tais restrições, contudo, variam de forma dinâmica, pois são dependentes da radiação solar incidente e da temperatura do módulo [24].

A característica de não linearidade do painel fotovoltaico é ilustrada na Figura 2.15, explicitando tensão e corrente na saída de um módulo fotovoltaico genérico submetido a radiação solar e temperatura quaisquer.

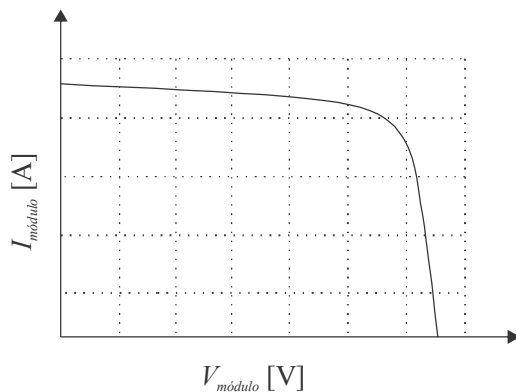


Figura 2.15: Relação entre tensão e corrente de um módulo genérico.

Ainda observando a Figura 2.15 é possível encontrar duas regiões distintas de operação e uma região de transição. Há uma região em que o módulo opera como fonte de corrente, onde amplas variações de tensão são contrastadas com baixas variações de corrente. Em outra região, conhecida como região de fonte de tensão, é possível observar que para amplas variações de corrente há pequenas variações de tensão. Entre elas há uma região de transição.

A Figura 2.16 apresenta as três regiões, sendo 1 a região de operação como fonte de corrente, 2 a região de transição e 3 a região de fonte de tensão.

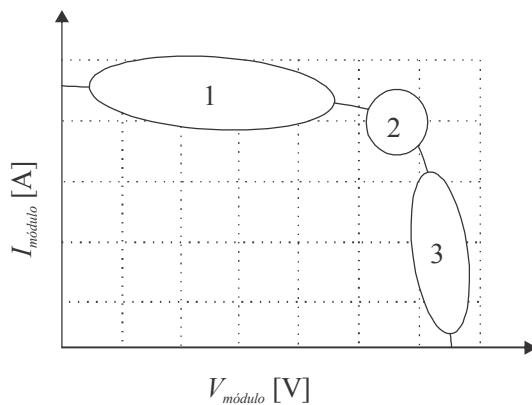


Figura 2.16: Regiões de operação do módulo fotovoltaico.

Para cada condição de temperatura e radiação solar há uma curva característica de tensão e corrente, sendo que o módulo fotovoltaico pode assumir apenas um ponto qualquer de operação. Esse ponto pode variar e depende basicamente da impedância da carga vista pelo módulo fotovoltaico. A potência de saída do módulo fotovoltaico é produto da tensão de saída pela corrente de saída. O resultado é explicitado na Figura 2.17, gráfico em que a potência de saída é traçada em função da tensão de saída.

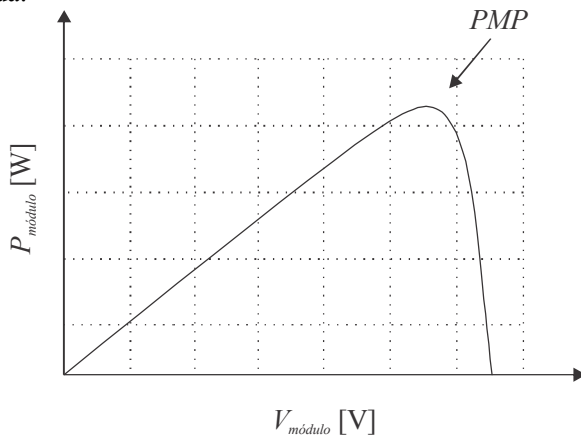


Figura 2.17: Relação entre tensão e potência de um módulo genérico.

Observa-se na Figura 2.17 que existe apenas um ponto onde a potência é máxima. Conhecido como ponto de operação de máxima potência (PMP), localiza-se na região dois da Figura 2.16. A maioria dos projetos que utilizam energia fotovoltaica operam seus módulos nesta região por razões óbvias: maior rendimento e redução na quantidade de módulos utilizados.

Para operar nessa região utilizam-se conversores estáticos capazes de controlar o ponto de operação do módulo. Há literatura bastante extensa sobre diversas alternativas e topologias. Esses conversores são normalmente dotados de sensores e algoritmos capazes de rastrear no ponto de operação de máxima potência, sendo conhecidos como rastreadores de máxima potência (MPPT), sobre os quais existe também vasta literatura.

2.4 Influência de fatores ambientais na geração fotovoltaica

Pela característica dos módulos fotovoltaicos de converter energia elétrica diretamente da radiação solar, fatores ambientais ao qual o módulo está submetido influenciam sua capacidade de geração de energia. Os fatores mais críticos serão abordados a seguir.

2.4.1 Temperatura

A temperatura a qual o módulo fotovoltaico está submetido pode ser considerada como uma medida indireta do grau de agitação das moléculas que o compõe.

A elevação da temperatura influencia em dois aspectos opostos, tratados superficialmente: o primeiro deles ocorre com a elevação da temperatura dos cristais de silício, tornando a vibração dos átomos mais intensa, acarretando em corrente elétrica discretamente mais alta, consequência do aumento das colisões entre átomos e fótons.

Por outro lado, o aumento da temperatura impacta no fato de elétrons livres e lacunas possuírem excesso de energia térmica e se “empurrarem” contra a junção *pn* no sentido contrário do campo elétrico da célula fotovoltaica, reduzindo, assim, a tensão de saída na célula. Na Figura 2.18 observa-se a influência da temperatura de saída de forma genérica para $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$.

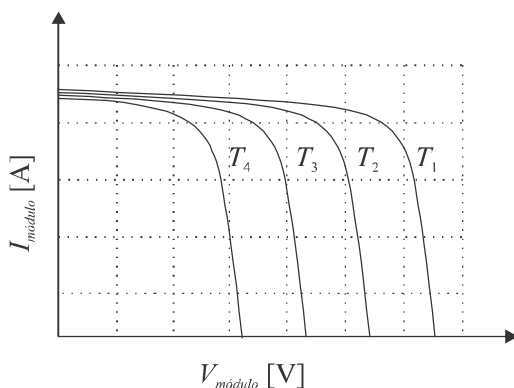


Figura 2.18: Influência da temperatura na tensão de saída do módulo fotovoltaico.

2.4.2 Radiação Solar

A radiação solar é proporcional a quantidade de fótons absorvidos pelo módulo fotovoltaico. A redução da radiação solar incidente implica na redução de elétrons livres, fato que reduz fortemente o valor de saída da corrente no módulo, enquanto a tensão de saída sofre uma leve redução.

Na Figura 2.19 é observável a redução na corrente de saída em função da diminuição da radiação solar, mantendo-se a temperatura constante, sendo a radiação $S_1 > S_2 > S_3 > S_4$.

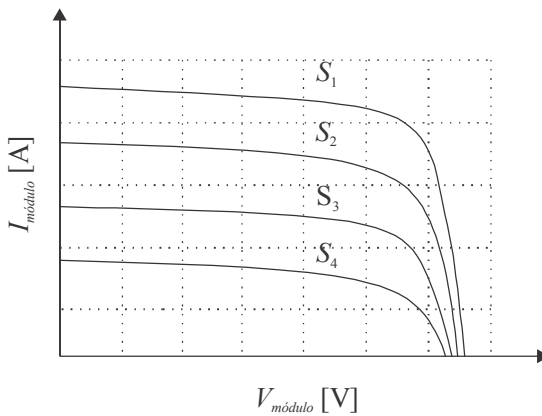


Figura 2.19: Influência da radiação solar na corrente de saída do módulo fotovoltaico.

2.5 Condição padrão de teste em sistemas fotovoltaicos

Para que exista condições iguais em testes de desempenho de módulos fotovoltaicos há definição de uma condição padrão de teste. A condição padrão de teste (STC – *Standart Teste Conditions*) especifica nível de radiação solar de 1000 W/m^2 , temperatura de superfície do módulo em $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e índice de massa de ar igual a 1,5 [25].

2.6 Bomba submersa vibratória

A bomba hidráulica escolhida para este projeto é bastante comum em território nacional, sendo amplamente utilizada em poços e cisternas. Conhecida pela sua simplicidade, baixo custo e robustez, necessita de

baixa manutenção pelo fato de não possuir elementos mecânicos rotativos.

Seu funcionamento baseia-se na variação da força eletromagnética que é gerada por um eletroímã acoplado a um êmbolo, quando aplicada corrente alternada [27].

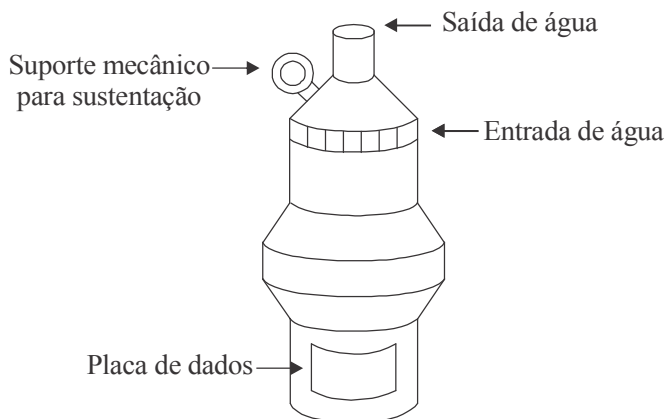


Figura 2.20: Características externas de uma bomba vibratória.

Durante a aspiração, o eletroímã está ativo, ou seja, atraindo a estrutura metálica conectada ao êmbolo, que por sua vez tende a produzir vácuo no interior da bomba. A diferença de pressão provoca a abertura da válvula de aspiração e mantém fechada a válvula de recalque. A água escoou para dentro da bomba através de uma grade, exibida na Figura 2.20.

Durante o processo de descarga, o eletroímã mantém-se desativado e o êmbolo exerce pressão sobre o líquido, causando a abertura da válvula de recalque e fechando a válvula de aspiração. A água é impelida a sair pelo tubo de recalque.

Os detalhes de funcionamento estão descritos na Figura 2.21 e Figura 2.22.

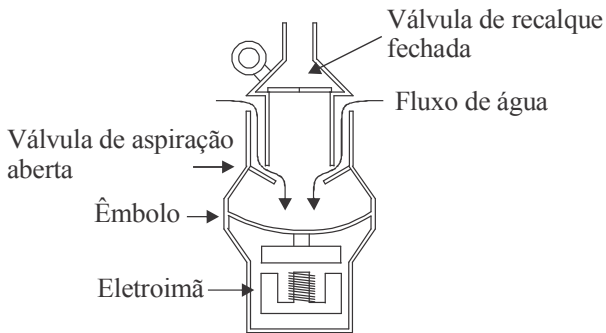


Figura 2.21: Bomba vibratória durante aspiração.

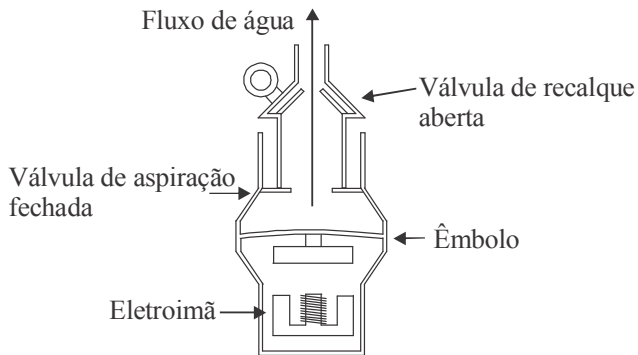


Figura 2.22: Bomba vibratória durante descarga.

A Figura 2.23 apresenta a capacidade de vazão da bomba em função da coluna d'água apresentada pelo fabricante.

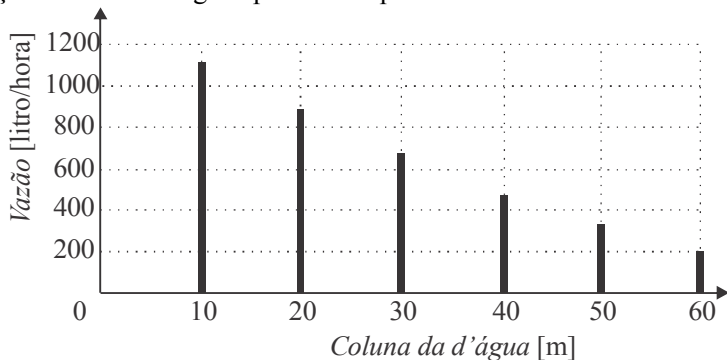


Figura 2.23: Capacidade de vazão da bomba.

2.7 Conclusão

Procurou-se, neste capítulo, esclarecer alguns conceitos básicos necessários para o bom entendimento das decisões tomadas no decorrer dessa dissertação.

Ressalta-se a importância da compreensão dos conceitos de máxima potência e regiões de operação quando utilizados sistemas fotovoltaicos de energia. Tais conceitos são essenciais na definição do método de atuação dos conversores.

Os fatores ambientais também figuram como determinantes na geração de energia e sua capacidade de influenciar a tensão e corrente devem ser compreendidos. Não menos importante, as características construtivas da bomba vibratória são essenciais para a compreensão da mesma, justificando seu baixo custo e formas de onda de tensão e corrente drenadas.

3 ESTÁGIO ELEVADOR DE TENSÃO

3.1 Introdução

A geração de energia fotovoltaica através de um arranjo com limitada quantidade de módulos para posterior alimentação de carga, em corrente alternada, pode trazer consigo alguns desafios adicionais. Em aplicações de baixa potência, poucos módulos podem ser capazes de suprir as necessidades da carga neste requisito, mas a tensão eventualmente não atingirá as exigências de projeto.

Um exemplo dessa situação é encontrado no presente projeto, onde os requisitos da tensão de entrada e saída do estágio cc-cc são exibidos na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Tensão de entrada, saída e ganho estático requerido.

| Tensão de entrada [V_{pv}] | Tensão de saída [V_{bar}] | Ganho [G_B] |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 40 V | 220 V | $G_B = 5,5$ |
| 60 V | 220 V | $G_B = 3,67$ |

Analisando os valores apresentados, conclui-se que o ganho estático requerido é alto, sendo que configurações elevadoras de tensão convencionais não são adequadas devido às elevadas perdas de condução dos semicondutores, quando operam com razão cíclica elevada.

Existe significativa quantidade de material bibliográfico disponível sobre conversores cc-cc elevadores, tanto não isoladas [28], [29], quanto isolados [30]. De maneira geral, a complexidade desses conversores cresce conforme o aumento na necessidade de ganho estático, utilizando para isso diversos artifícios como indutores acoplados, transformadores, autotransformadores, etc.

Citado anteriormente, um importante objetivo foi manter o projeto simples, de fácil manutenção e substituição. Assim sendo, sistemas de acionamento e de controle também devem ser simplificados e os esforços nos semicondutores, adequados. Dentre os conversores que foram analisados, [31], [32], [33], o conversor cc-cc Boost quadrático de três níveis (QTN) apresentado em [33] atendeu bem os requisitos determinados anteriormente.

3.2 Conversor CC-CC Boost QTN

O conversor Boost QTN estudado neste capítulo tem a configuração básica apresentada na Figura 3.1.

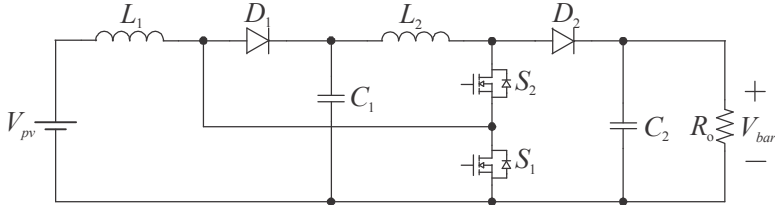


Figura 3.1: Conversor CC-CC Boost QTN [32].

Inicialmente desenvolvido para aplicações com células a combustível, devido às suas características peculiares, também é adequado em conversores conectados a módulos fotovoltaicos, uma vez que essas aplicações comumente necessitam de um conversor cc-cc com amplo ganho estático e baixa ondulação da corrente de entrada.

A relação entre a tensão de entrada e saída do conversor é determinada em (3.1), onde D ou razão cíclica é a razão entre o intervalo de tempo que o semicondutor S_2 é comandado a conduzir e o período total de comutação, definido em (3.2). A variável α relaciona o período de condução de S_1 ao período de condução de S_2 , formalizada em (3.3).

$$G_B = \frac{V_{bar}}{V_{pv}} = \frac{1 - D(1 - \alpha)}{(1 - D)(1 - \alpha D)} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{T_{S2}}{T} \quad (3.2)$$

$$\alpha = \frac{T_{S2}}{T_{S1}} \quad (3.3)$$

A Figura 3.2 ilustra a sequência de comando adotada para esse conversor, bem como os períodos de condução dos semicondutores.

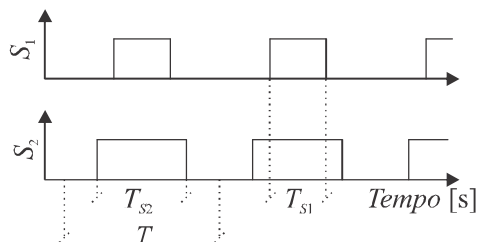


Figura 3.2: Sequência de comando do conversor Boost QTN, sendo T o período de comutação.

Uma rápida análise da variável α demonstra que, caso os semicondutores S_1 e S_2 conduzam durante o mesmo período, com $\alpha = 1$, o ganho estático do conversor se resume a (3.4), ou seja, o ganho quadrático de um conversor Boost convencional, justificando, assim, seu nome.

$$G_B = \frac{1}{(1-D)^2}, \text{ se } \alpha = 1 \quad (3.4)$$

Um estudo mais detalhado do conversor cc-cc Boost QTN, onde é possível verificar as formas de onda da tensão e corrente nos componentes, etapas de operação e ganhos em função de α , pode ser encontrado em [34].

3.3 Características estáticas do conversor

Embora a análise da equação (3.1) indique a possibilidade de obter-se altos ganhos com o referido conversor, na prática, seu ganho é limitado.

Apesar de o modelo apresentado na Figura 3.1 retratar o conversor Boost QTN, não introduz seus parâmetros de perda, causados pela presença dos elementos parasitas nos componentes que o constitui. Quando considerados, tais elementos implicam obtenção de outro modelo, representado na Figura 3.3.

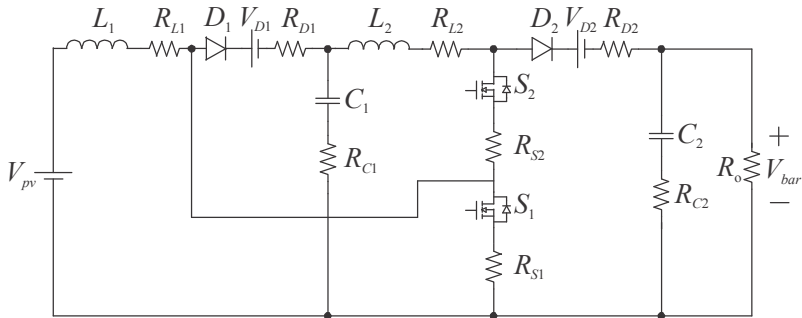


Figura 3.3: Boost QTN com perdas.

A partir dessa nova configuração, as perdas de condução nos componentes ganham importância com o aumento da razão cíclica, até o ponto em que se tornam dominantes na equação de transferência estática do conversor, fazendo com que o ganho seja nulo para razão cíclica próxima da unidade. A Figura 3.4 explicita o ganho do conversor para toda a faixa possível de variação da razão cíclica.

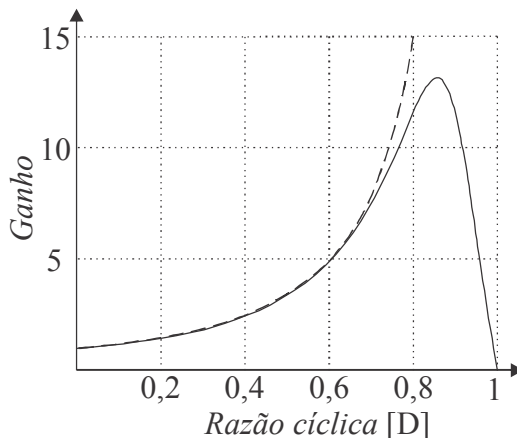


Figura 3.4: Ganho estático do conversor Boost QTN: ideal e com perdas.

A linha tracejada na Figura 3.4 representa o ganho teórico do conversor, caso seus componentes fossem ideais. A linha contínua representa o ganho real do conversor, utilizando dados dos componentes utilizados no protótipo, que será posteriormente apresentado.

Resgatando os valores da Tabela 3-1, para ganhos entre 3,67 e 5,5, verifica-se que a razão cíclica variará, respectivamente, entre 0,526 e

0,63. A operação nessa região garante certo grau de linearidade entre razão cíclica e ganho do conversor, como pode ser visto na região em destaque da Figura 3.5.

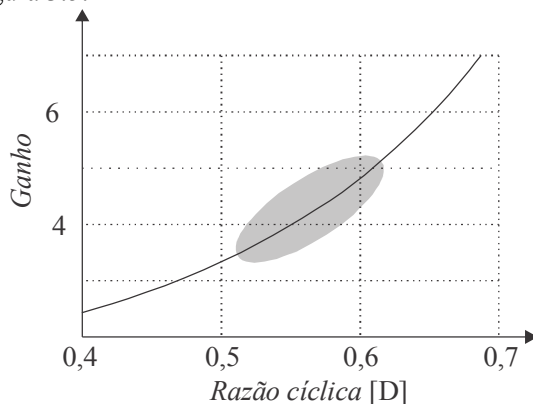


Figura 3.5: Região de operação do conversor.

Embora a região de máximo ganho do conversor deva ser evitada por diversas razões, como por exemplo, a elevação das perdas por condução dos semicondutores e instabilidade no ganho do conversor, a razão cíclica de máximo ganho do conversor é 0,855, com ganho em torno de 13,5.

3.4 Dimensionamento do conversor

Após constatada a capacidade de o conversor escolhido operar conforme as necessidades de projeto, o dimensionamento dos componentes foi realizado, de maneira a atender os requisitos exibidos na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Especificações básicas para dimensionamento do conversor.

| | |
|--|---------|
| Tensão mínima de entrada | 40 V |
| Tensão máxima de entrada | 60 V |
| Tensão de saída | 220 V |
| Potência ativa de saída | 420 W |
| Potência aparente de entrada do estágio elevador | 1500 VA |
| α | 0,875 |
| Frequência de comutação | 50 kHz |
| Ondulação no indutor L_1 | 10% |
| Ondulação de corrente no indutor L_2 | 20% |
| Ondulação de tensão no capacitor C_1 | 2% |
| Ondulação de tensão no capacitor C_2 | 2% |

Os cálculos que originaram os valores abaixo apresentados constam no APÊNDICE A.

3.4.1 Indutor L_1

As características de projeto do indutor L_1 estão explicitadas na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Aspectos construtivos do indutor L_1 .

| | |
|----------------------------------|----------------|
| Indutância | 0,599 mH |
| Núcleo | E 55/50 IP12 |
| Número de espiras | 21 |
| Entreferro | 0,799 mm |
| Condutor utilizado | AWG 25 |
| Número de condutores em paralelo | 12 |
| Resistência | 0,043 Ω |

3.4.2 Indutor L_2

As características de projeto do indutor L_2 estão explicitadas na Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Aspectos construtivos do indutor L_2 .

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Indutância | 1,127 mH |
| Núcleo | E 55/28 IP12 |
| Número de espiras | 45 |
| Entreferro | 0,951 mm |
| Condutor utilizado | AWG 25 |
| Número de condutores em paralelo | 7 |

3.4.3 Capacitor C_1

As restrições sobre o capacitor C_1 são apresentadas na Tabela 3-5.

Tabela 3-5: Restrições do Capacitor C_1 .

| | |
|--------------|---------------------|
| Capacitância | 22,47 μF |
| Corrente | 4,66 A |
| Tensão | 100 V |

Empregou-se um capacitor Epcos, modelo M108309539, 300 V, 20 μF .

3.4.4 Capacitor C_2

O projeto do capacitor C_2 foi mais delicado devido às características da carga do conversor inversor. Como pode ser constatado na Tabela 3-2, o fator de potência da carga é baixo. Assim, embora a potência ativa consumida pela carga seja reduzida, existe grande amplitude na corrente drenada pelo inversor, implicando em oscilação na tensão de saída. Isso significa que o dimensionamento do capacitor de saída não deve levar em consideração apenas o período de carregamento e descarregamento do capacitor durante a comutação, mas também a potência aparente consumida pela bomba hidráulica e seu reflexo no barramento cc.

Tabela 3-6: Esforços de tensão e corrente no capacitor C_2 .

| | |
|--------------|-------|
| Capacitância | 2 mF |
| Corrente | 10 A |
| Tensão | 220 V |

Foram utilizados dois capacitores em paralelo, com valores de 1000 μF , 250 V da fabricante Samwha, para absorver a oscilação da

tensão em baixa frequência, e um capacitor Epcos M108309539, 300 V, 20 μ F, para alta frequência.

3.4.5 Interruptores S_1 e S_2

Empregando-se dos esforços de corrente e de tensão calculados e disponibilizados na Tabela 3-7, optou-se por utilizar semicondutores IPP600N25N3, da fabricante *Infineon Technologies*, .

Tabela 3-7: Esforços de tensão e corrente nos interruptores S_1 e S_2 .

| | |
|-----------------------|--------|
| Corrente média S_1 | 6,49 A |
| Corrente eficaz S_1 | 9,15 A |
| Tensão média S_1 | 131 V |
| Corrente média S_2 | 2,58 A |
| Corrente eficaz S_2 | 3,41 A |
| Tensão máxima S_2 | 89 V |

As principais informações sobre o semicondutor S_1 e S_2 estão expostas na Tabela 3-8.

Tabela 3-8: Características do semicondutor S_1 e S_2

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Resistência de condução | 60 m Ω |
| Tensão máxima de bloqueio | 250 V |
| Corrente máxima de condução | 15 A |
| Tensão de condução do diodo | 1,2 V |
| Corrente máxima no diodo | 25 A |

3.4.6 Diodos D_1 e D_2

Assim como no item anterior, a partir da análise dos esforços de tensão e de corrente apresentado na Tabela 3-9, definiu-se a utilização dos diodos IDW12G65C5, produzidos pela *Infineon Technologies*.

Tabela 3-9: Esforços de tensão e corrente nos diodos D_1 e D_2 .

| | |
|-----------------------|--------|
| Corrente média D_1 | 5,15 A |
| Corrente eficaz D_1 | 6,51 A |
| Tensão máxima D_1 | 100 V |
| Corrente média D_2 | 1,91 A |
| Corrente eficaz D_2 | 2,94 A |
| Tensão máxima D_2 | 220 V |

As principais informações sobre o semicondutor D_3 e D_4 estão expostas na Tabela 3-10.

Tabela 3-10: Características do semicondutor D_3 e D_4

| | |
|----------------------|-------|
| Tensão de bloqueio | 650 V |
| Corrente de condução | 12 A |
| Tensão de condução | 1,4 V |

3.4.7 Elementos parasitas

Os elementos parasitas associados aos componentes utilizados estão listados na Tabela 3-11. Esses elementos são exibidos na Figura 3.3 e são os responsáveis pela limitação do ganho de tensão do conversor, visto na Figura 3.4.

Tabela 3-11: Elementos parasitas associados aos componentes do conversor para temperatura de operação de 100 °C.

| | |
|--|--------|
| Resistência parasita do Indutor L_1 | 43 mΩ |
| Resistência parasita do Indutor L_2 | 114 mΩ |
| Resistência parasita do capacitor C_1 | 5,3 mΩ |
| Resistência parasita do capacitor C_2 | 5,3 mΩ |
| Resistência parasita dos interruptores S_1 e S_2 | 90 mΩ |
| Resistência parasita dos diodos D_1 e D_2 | 60 mΩ |
| Tensão de condução dos diodos D_1 e D_2 | 0,94 V |

3.5 Modelo por valores médios de grandes sinais

Para redução do tempo de simulação e simplificação das análises, foi obtido o modelo médio de grandes sinais do conversor Boost QTN. A desvantagem da utilização do modelo por valores médios é a perda de informação de alta frequência. Entretanto, devido à necessidade de simulação do sistema por longos períodos, para acompanhar a dinâmica da temperatura da superfície do módulo fotovoltaico, torna-se vantajoso seu emprego por permitir redução do tempo de simulação, além de reduzir o volume de dados oriundos do software de simulação. Tem-se na Figura 3.6 modelo médio de grandes sinais para o conversor Boost QTN.

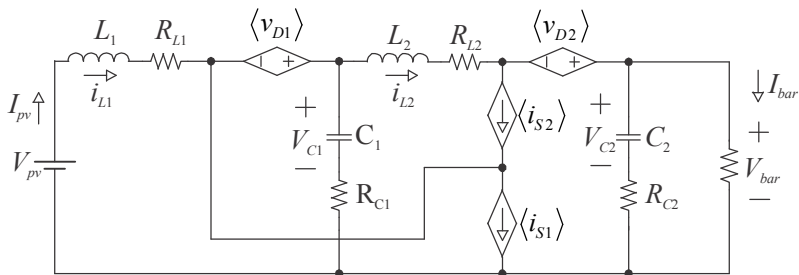


Figura 3.6: Modelo médio para grandes sinais do conversor Boost QTN.

O desenvolvimento do modelo por valores médios com perdas, desenvolvido conforme [37], encontra-se no APÊNDICE A, trazendo detalhadamente o equacionamento do circuito. As equações resultantes estão explicitadas em (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8).

$$\langle i_{S2} \rangle = Di_{L2} \quad (3.5)$$

$$\langle i_{S1} \rangle = \alpha D(i_{L1} + i_{L2}) \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \langle v_{D1} \rangle = & i_{L1}(\alpha D(R_{C1} + R_{S1}) + \alpha D V_{C1} \\ & + i_{L2}(\alpha D R_{S1} + D R_{D1}(\alpha - 1)) \\ & + V_{D1}(\alpha D - 1) + R_{D1}(\alpha D - 1) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \langle v_{D2} \rangle = & v_{C2} D(1 - \alpha) + i_{L1} D R_{C1}(\alpha - 1) \\ & + i_{L2}(D R_{L2}(1 - \alpha) + R_{D2}(D - 1)) + v_{C1} D(\alpha - 1) \\ & + i_{Bar} D(1 - \alpha) + V_{D2}(D - 1) \end{aligned} \quad (3.8)$$

A partir do circuito analisado, exposto na Figura 3.6, o modelo resultante foi recriado no software *PSIM*, conforme a Figura 3.7

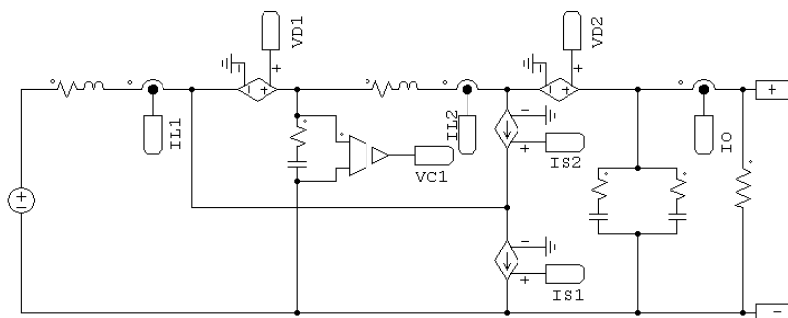


Figura 3.7: Modelo médio de grandes sinais voltados a simulação.

No APÊNDICE C encontra-se o circuito elétrico necessário para simulação do circuito presente na Figura 3.7. Os resultados de simulação obtidos através do modelo comutado e do modelo médio são encontrados nas Figura 3.8 e Figura 3.9, onde o índice “a” refere-se ao modelo comutado e “b”, ao médio.

Observa-se na Figura 3.8 o comportamento idêntico da tensão V_{bar} , respondendo a um degrau na referência da tensão de saída.

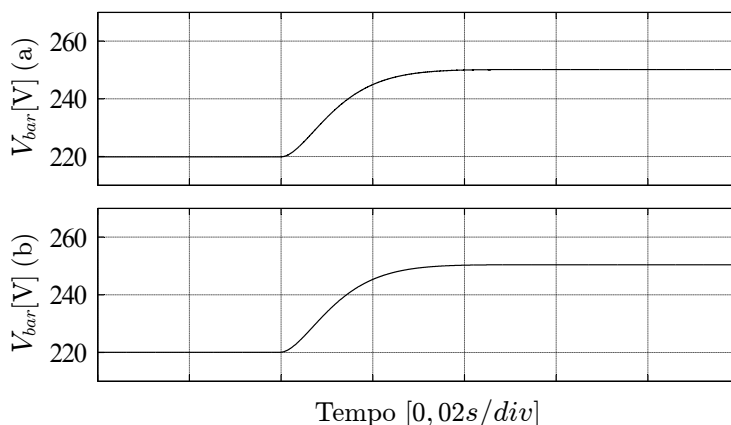


Figura 3.8: Tensão V_{bar} , sendo a tensão “a” resultante da simulação do modelo comutado e “b” médio.

A Figura 3.9 representa a corrente na entrada do conversor (I_{pv}) demonstrando o bom funcionamento do circuito desenvolvido por valores médios.

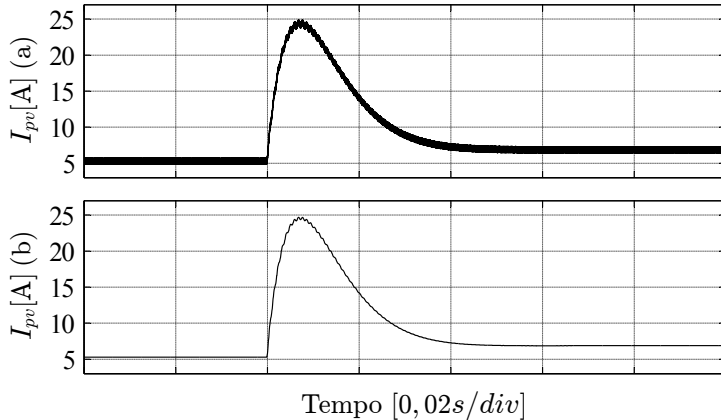


Figura 3.9: Corrente I_{pv} , sendo a corrente “a” resultante da simulação do modelo comutado e “b” médio.

Assim, comprova-se a similaridade estático-dinâmica dos modelos médio e comutado do conversor Boost QTN.

3.6 Esforços de tensão e de corrente nos componentes

Um protótipo foi construído com o objetivo de analisar o comportamento do conversor operando em malha aberta. Para isso, uma fonte cc foi utilizada alimentando carga resistiva dimensionada para consumir a potência nominal de projeto. Todas as formas de ondas seguintes são leituras obtidas da experimentação com o protótipo. Os valores da tensão e corrente na entrada do conversor são expostas na Figura 3.10.

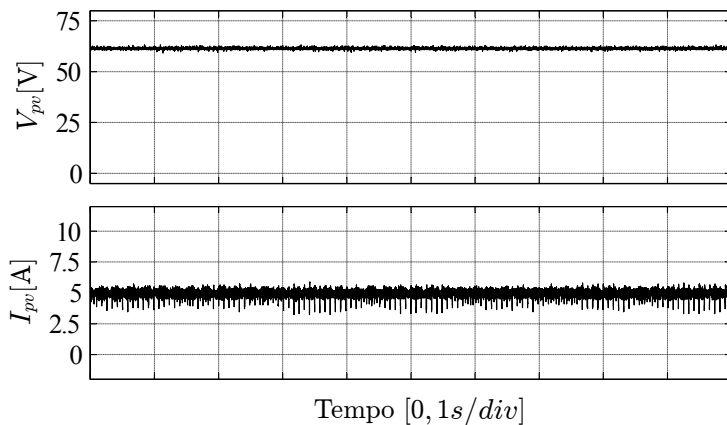


Figura 3.10: Tensão e corrente de entrada do conversor Boost QTN.

O detalhe do comportamento da tensão e da corrente no circuito, sob carga nominal, analisados na Figura 3.11.

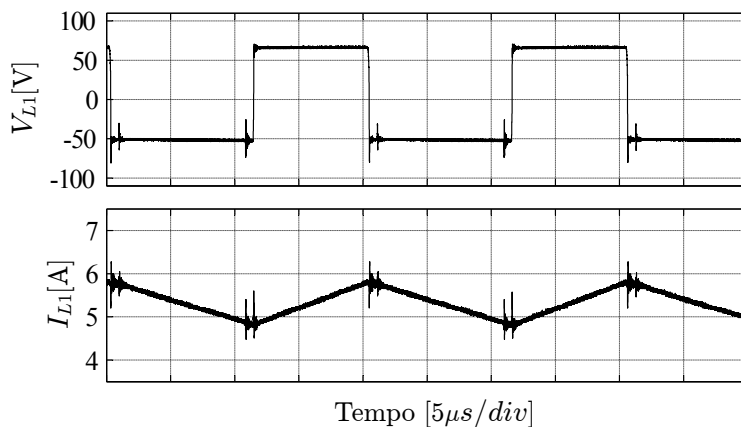


Figura 3.11: Tensão e corrente no indutor L_1 .

Detalhes do comportamento da tensão e da corrente no indutor L_2 são expostos na Figura 3.12.

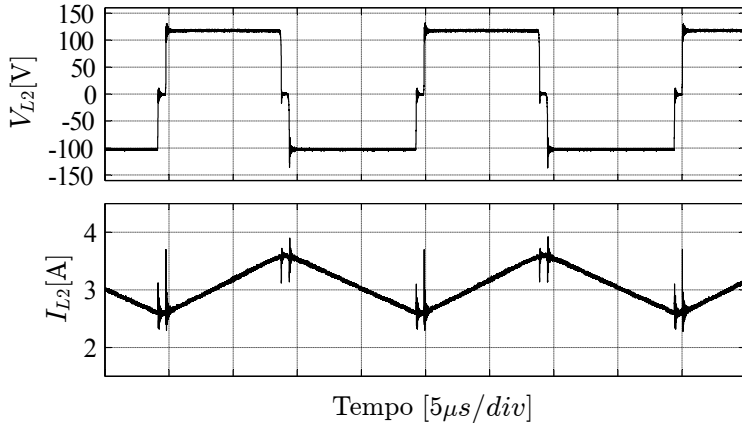


Figura 3.12: Tensão e corrente no indutor L_2 .

A tensão aplicada nos diodos D_1 e D_2 são vistos na Figura 3.13.

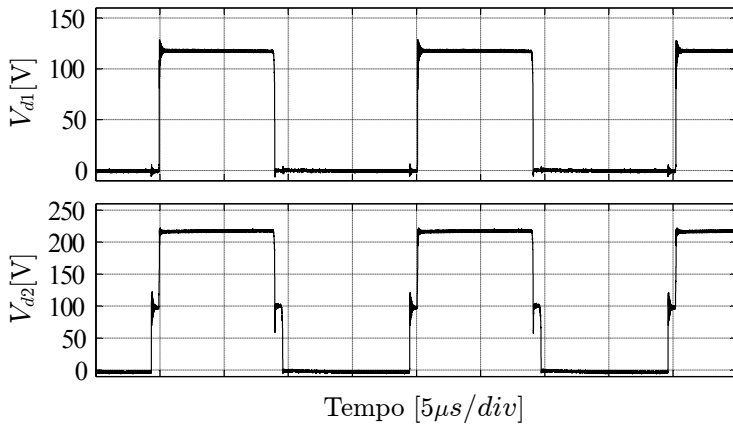


Figura 3.13: Tensão no diodo D_1 e D_2 , respectivamente.

As tensões nos semicondutores podem ser vistas na Figura 3.14.

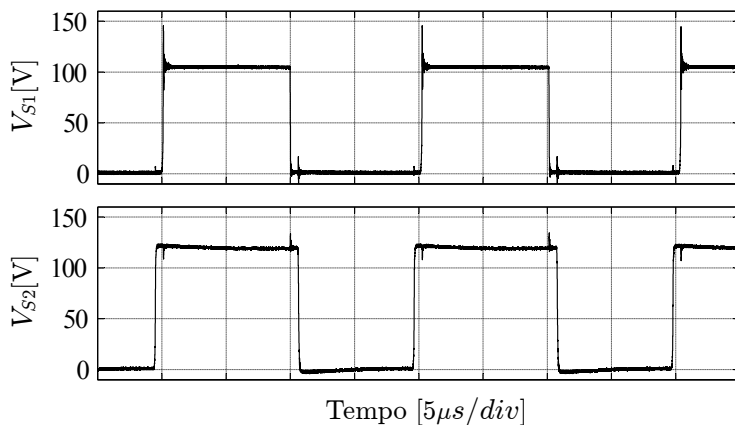


Figura 3.14: Tensão no semicondutor S_1 e S_2 , respectivamente.

A tensão e corrente de saída são expostas na Figura 3.15.

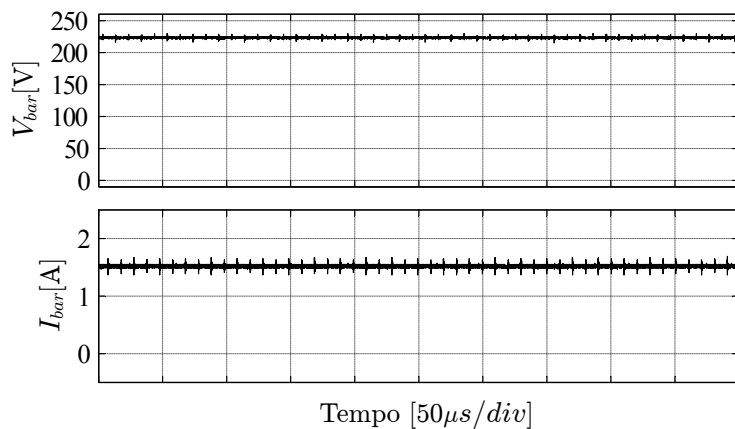


Figura 3.15: Tensão e corrente de saída do conversor Boost QTN.

Por fim, a Figura 3.16 apresenta a tensão de entrada e saída do conversor Boost QTN.

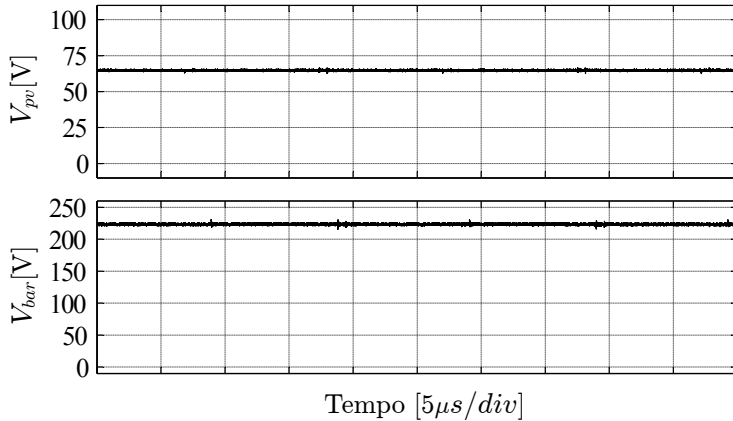


Figura 3.16: Tensão de entrada e de saída do conversor.

3.7 Conclusão

A partir dos requisitos de projeto apresentados, encontrou-se um conversor capaz de alcançar amplos ganhos de tensão, reduzida ondulação de corrente na entrada, robustez, etc. Dentre os conversores estudados o conversor Boost QTN [33] demonstrou-se capaz de cumprir estes requisitos.

O modelo por valores médios com perdas desenvolvidos mostrou-se capaz de retratar com fidelidade o comportamento dinâmico de baixa frequência do conversor.

O cálculo dos esforços de tensão e corrente calculados foram utilizados a fim de selecionar componentes capazes de operar dentro das especificações do projeto com boa eficiência. O funcionamento adequado do protótipo é comprovado através da apresentação das formas de onda de tensão e corrente nos componentes.

4 ESTÁGIO INVERSOR

4.1 Introdução

Conforme anteriormente mencionado, módulos fotovoltaicos são fontes não lineares, cujos valores de tensão e corrente disponibilizados são fortemente influenciados pela radiação solar incidente e pela temperatura de superfície, bem como pelo tipo de carga ao qual estão conectados.

O prévio processamento da energia gerada pelo conversor Boost QTN permite adequar a tensão dos módulos, gerando um barramento cc controlado enquanto houver disponibilidade de energia, isto é, radiação solar.

Evidentemente, nem todas as cargas podem ser alimentadas em corrente contínua. Especificamente, a bomba hidráulica utilizada requer alimentação com tensão senoidal com 110 V eficazes e frequência de 60 Hz. Assim sendo, o emprego de um segundo estágio de processamento de energia é crucial. O conversor empregado nesse estágio deve realizar a conversão cc-ca, sendo denominado inversor de tensão, cuja topologia, controle e modulação, definem suas características de operação.

Dentre as possibilidades existem vasta literatura que cobre o assunto, optou-se pelo uso do conversor cc-ca monofásico em ponte completa, com controle da tensão de saída e modulação PWM senoidal 3 níveis. Detalhes da operação desse conversor são obtidos em [35].

4.2 Conversor cc-ca monofásico PWM

O conversor utilizado, simplificado e sem carga, pode ser visto na Figura 4.1.

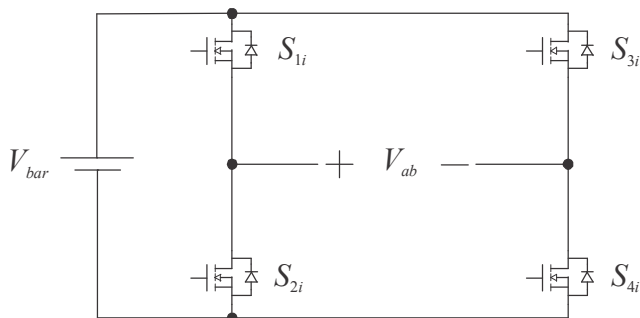


Figura 4.1: Inversor em ponte completa.

Como citado anteriormente, essa topologia é bastante conhecida devido sua versatilidade. Várias metodologias de comando dos interruptores podem ser utilizadas, como modulação por largura de pulso, deslocamento de fase, etc.

4.3 Características estáticas do conversor

O comando adequado dos interruptores torna possível obter o controle da tensão aplicada em V_{ab} , que se estabelece em três patamares: V_{bar} , 0 e $-V_{bar}$. A sequência e o período em que os semicondutores são acionados, doravante denominada modulação, pode ser conduzida de tal forma que venha a apresentar uma componente fundamental de 60 Hz com amplitude de 155 V.

Tal configuração é obtida pela comparação de um sinal modulante senoidal (V_{Sen}) com duas portadoras triangulares (V_{Tri1} e V_{Tri2}) defasadas de 180° entre si, conforme ilustrado na Figura 4.2

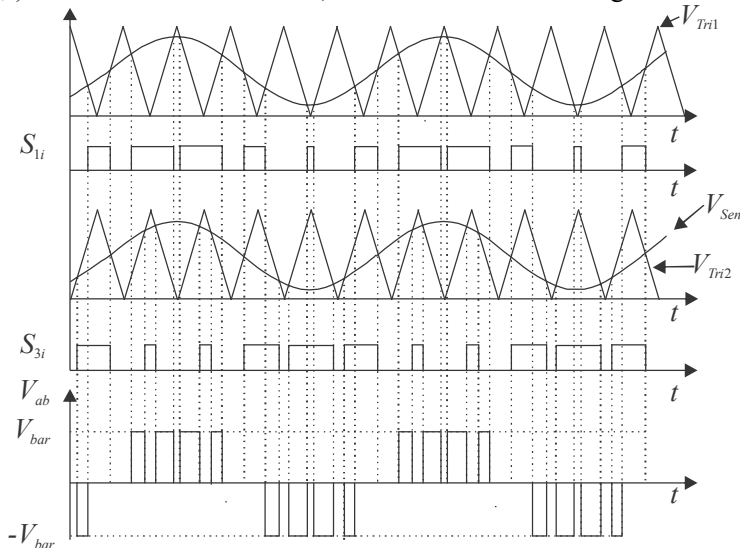


Figura 4.2: Modulação empregada.

Por meio da comparação entre V_{Tri1} e V_{Sen} , aciona-se S_{1i} durante o intervalo de tempo em que a amplitude de V_{Sen} for maior que V_{Tri1} . Contudo, durante o intervalo em que V_{Tri1} possui amplitude maior que V_{Sen} , S_{1i} é comandada a bloquear. Adicionalmente, S_{2i} funciona de forma complementar.

A comparação entre V_{Tri2} e V_{Sen} funciona de forma inversa. S_{3i} é comandada a conduzir enquanto V_{Sen} possui amplitude menor que V_{Tri2} . S_{3i} é comandada a bloquear caso contrário. Da mesma forma, S_{4i} funciona de forma complementar em relação a S_{3i} .

Adicionalmente, existe necessidade de existir um intervalo de tempo onde não há comando de condução nas chaves do mesmo braço. Este período de tempo é necessário para evitar curto-circuito entre os semicondutores, assim, uma chave é completamente bloqueada para então o semiconductor complementar entrar em condução.

A utilização dessa modulação possibilita a redução de componentes harmônicas. Outro efeito é a frequência de variação da tensão aplicada em V_{ab} ser o dobro da frequência de comutação dos semicondutores, permitindo projetar o filtro de saída para frequências mais elevadas.

Ressalta-se que embora o valor médio quase instantâneo da tensão V_{ab} seja senoidal, existe um espectro harmônico de alta frequência não desprezível [35], tornando necessária a inserção de um filtro LC, proporcionando ao conversor a característica almejada de saída em tensão senoidal. Um esboço do conjunto é encontrado na Figura 4.3, sendo L_f e C_f o indutor e capacitor de filtro e V_o tensão de saída.

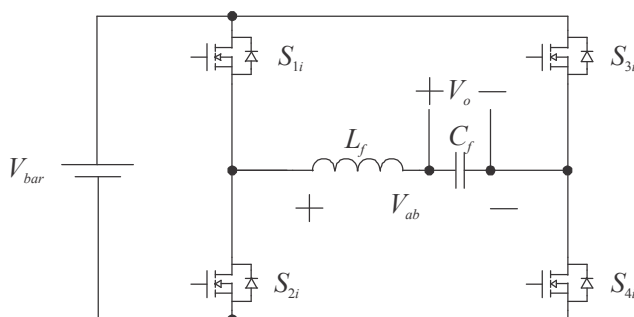


Figura 4.3: Inversor em ponte completa com filtro LC de saída.

Dimensionado conforme [35], o conversor é projetado de tal forma que a tensão de saída possua característica senoidal e reduzido conteúdo harmônico.

4.4 Dimensionamento

Após obtenção das características básicas do conversor, seguem os requisitos de projeto e seu dimensionamento.

Tabela 4-1: Dimensionamento básico do conversor.

| | |
|-------------------------|---------|
| Tensão de entrada | 220 V |
| Tensão de saída | 110 V |
| Índice de modulação | 0,707 |
| Frequência da carga | 60 Hz |
| Potência aparente | 1100 VA |
| Potência ativa | 290 W |
| Frequência de comutação | 50 kHz |

Os cálculos que deram origem aos resultados a seguir apresentados estão expostos no APÊNDICE D.

4.4.1 Semicondutores S_{1i} S_{2i} S_{3i} S_{4i}

Utilizando-se dos esforços de tensão e corrente disponibilizados na Tabela 4-2, empregou-se MOSFETs IRFB4229 da fabricante *International Rectifier*.

Tabela 4-2: Esforços de tensão e corrente nos semicondutores S_{1i} S_{2i} S_{3i} S_{4i} .

| | |
|-----------------|-------|
| Corrente eficaz | 9 A |
| Corrente média | 3,7 A |
| Tensão máxima | 220 V |

As principais informações sobre o semicondutores S_{1i} , S_{2i} , S_{3i} e S_{4i} estão expostas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Principais características do semicondutor IRFB4229.

| | |
|-----------------------------|-------|
| Tensão máxima de bloqueio | 250 V |
| Resistência de condução | 38 mΩ |
| Corrente de condução | 33 A |
| Tensão de condução do diodo | 1,3 V |
| Corrente máxima no diodo | 46 A |

4.4.2 Filtro de saída LC

O filtro de saída desenvolvido é do tipo LC passa baixa, cujos requisitos estão expostos na Tabela 4-4. Cabe salientar que a razão V_1/V e I_1/I são valores referentes à componente fundamental em relação ao espectro harmônico [35].

Tabela 4-4: Dimensionamento do filtro de tensão LC .

| | |
|------------------------|-----------|
| Frequência de corte | 5 kHz |
| Fator de amortecimento | 0,707 |
| Razão V_1/V | 0,984 |
| Razão I_1/I | 0,992 |
| Indutância | 0,495 mH |
| Capacitância | 2 μ F |

4.4.2.1 Indutor L_f

Após exposto os requisitos básicos do filtro de tensão, segue o detalhamento do indutor utilizado.

Tabela 4-5: Aspectos construtivos do indutor de filtro.

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Núcleo | E 55/25 IP12 |
| Frequência da tensão no indutor | 100 kHz |
| Número de espiras | 44 |
| Entreferro | 2,07 mm |
| Condutor Utilizado | AWG 26 |
| Número de condutores em paralelo | 20 |

4.4.2.2 Capacitor de filtro C_f

As restrições sobre o capacitor C_f são apresentadas na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Restrições do Capacitor C_f .

| | |
|--------------|-----------|
| Capacitância | 2 μ F |
| Corrente | 4,66 A |
| Tensão | 155,56 V |

O capacitor utilizado foi *Epcos*, modelo M110953558, 300 V, 2 μ F.

4.5 Modelo por valores médios

Apresenta-se na sequência o modelo médio para grandes sinais do inversor de ponte completa.

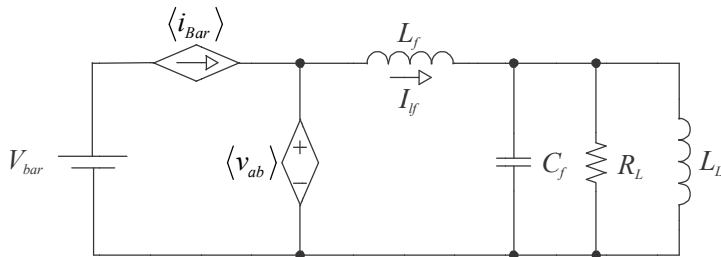


Figura 4.4: Modelo médio para grandes sinais do inversor de ponte completa.

Considerando que o desenvolvimento das equações do conversor por valores médios tornar-se-ia muito extenso, optou-se por detalhá-lo no APÊNDICE E. As equações finais estão expostas em (4.1) e (4.2).

$$\langle v_{ab} \rangle = dV_{bar} \quad (4.1)$$

$$\langle i_{bar} \rangle = dI_{L_f} \quad (4.2)$$

A partir das informações ilustradas na Figura 4.4, foi possível criar um circuito de simulação, exemplificado na Figura 4.5.

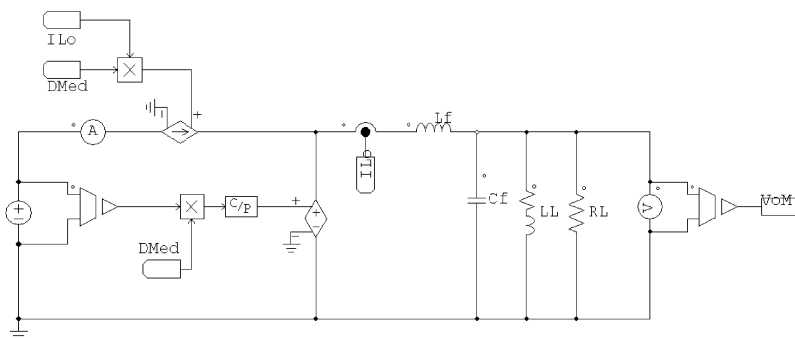


Figura 4.5: Circuito utilizado para simulação do modelo médio de grandes sinais do conversor cc-ca.

Os resultados de simulação do modelo comutado e do modelo médio estão dispostos na Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

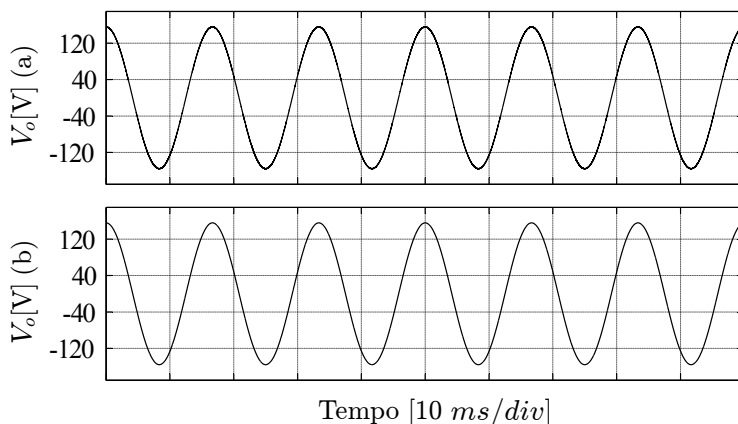


Figura 4.6: Tensão de saída do modelo comutado (a) e médio (b).

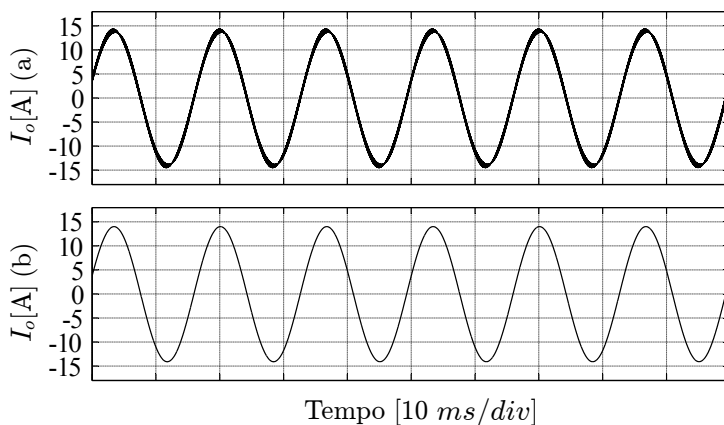


Figura 4.7: Corrente de saída do modelo comutado (a) e médio (b).

As Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam com detalhes a tensão e a corrente de saída, obtidas através do modelo comutado e médio, respectivamente.

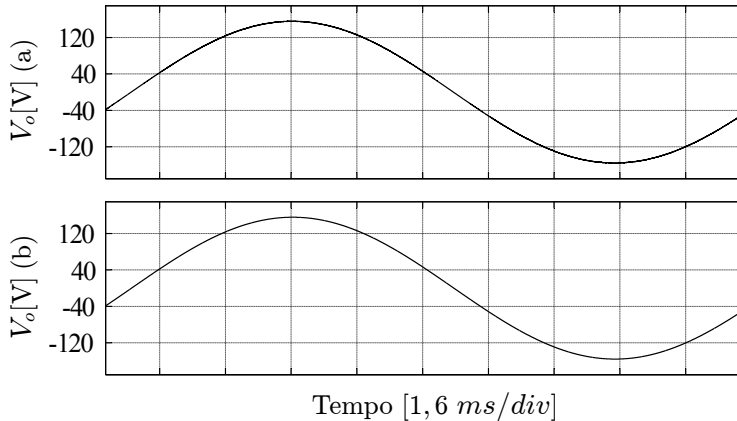


Figura 4.8: Detalhes da tensão de saída do modelo comutado (a) e médio (b).

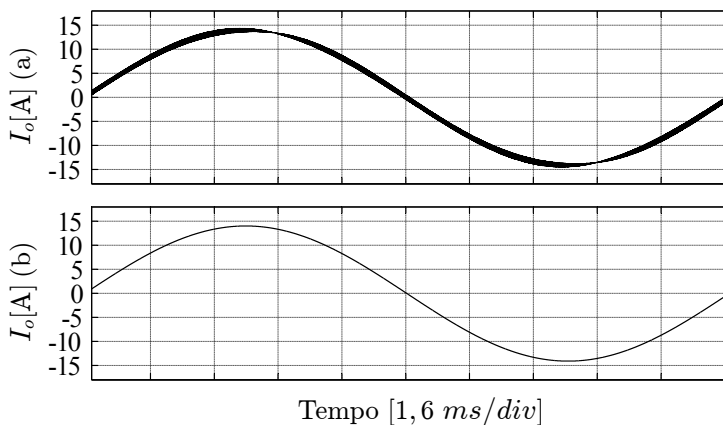


Figura 4.9: Detalhes da corrente de saída dos modelos comutado e médio.

4.6 Testes preliminares do inversor

Após o dimensionamento do circuito, foi construído um protótipo para validação das técnicas de modulação e dos esforços de tensão e corrente nos componentes, operando sob tensão e potência nominal em malha aberta.

A Figura 4.10 apresenta a tensão aplicada aos semicondutores S_{3i} e S_{4i} .

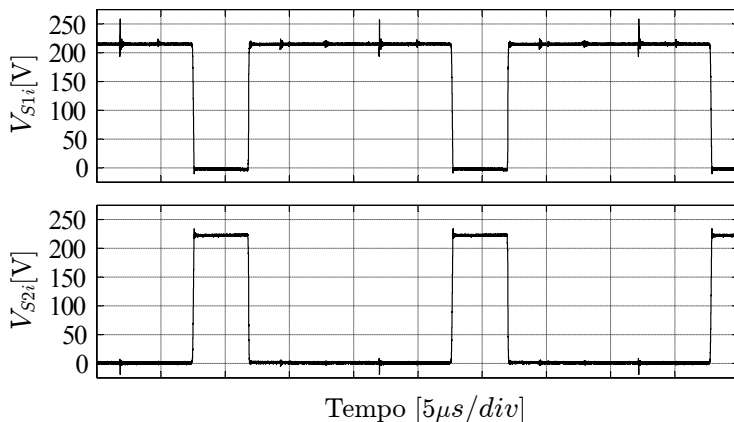


Figura 4.10: Tensão aplicada aos componentes S_{3i} e S_{4i} .

A Figura 4.11 exibe a tensão V_{ab} e a corrente I_o do inversor.

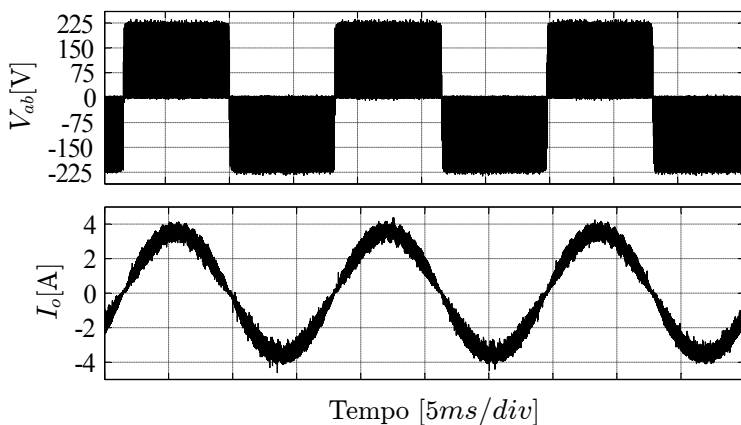


Figura 4.11: Tensão V_{ab} e corrente de saída do filtro I_o .

4.7 Conclusão

Os esforços obtidos através de cálculos foram utilizados para a especificação dos componentes utilizados. A boa escolha dos componentes resulta em boa eficiência e longa vida útil.

O modelo por valores médios desenvolvido facilitará no desenvolvimento da malha de controle da tensão de saída e na análise do comportamento do sistema nas simulações do sistema completo.

Por fim, os testes no protótipo comprovaram o bom funcionamento dos componentes utilizados e da placa confeccionada. Acredita-se no bom funcionamento dos dois estágios operando em série, após comprovação do funcionamento dos estágios operando de forma isolada.

5 SIMULAÇÕES DO SISTEMA COMPLETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Após a escolha dos conversores, seleção dos componentes e testes dos protótipos separadamente, faz-se necessário o desenvolvimento das estratégias de controle da tensão e atuação autônoma, para posterior interligação de todos os componentes que integram o sistema de bombeamento de água. Para isso, apresenta-se nesse capítulo a modelagem do arranjo fotovoltaico utilizado para testes práticos, assim como a modelagem da bomba hidráulica obtida a partir de ensaios em laboratório.

Posteriormente, encontrar-se-á o protótipo construído operando em malha fechada e os procedimentos e rotinas de acionamento e desligamento da carga sob perspectiva das diversas variáveis envolvidas, assim como a comparação entre os resultados de simulação e obtidos experimentalmente.

5.2 Modelagem da carga

Os aspectos construtivos da bomba hidráulica foram levantados no item 2.6. Contudo, suas características elétricas não foram devidamente abordadas.

Objetivando alcançar resultados de simulação fidedignos, a modelagem da carga é desenvolvida para posterior utilização. Desta forma, alimentou-se a carga com tensão senoidal com amplitude nominal, obtendo-se experimentalmente as formas de onda apresentadas na Figura 5.1.

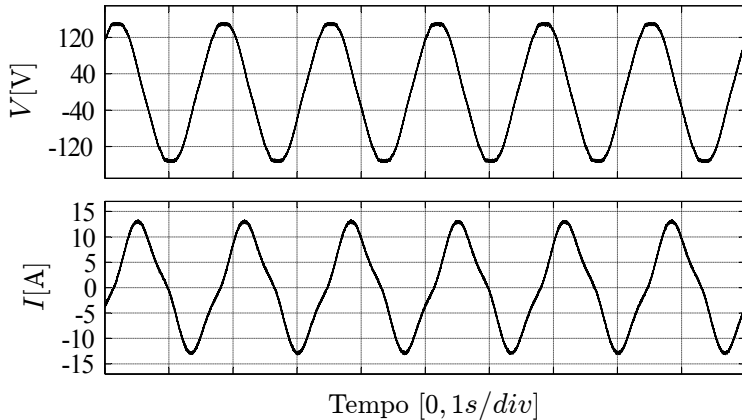


Figura 5.1: Tensão aplicada e a corrente drenada pela carga, obtidos experimentalmente.

Através do *software* SIMVIEW, capaz de analisar dados e grandezas elétricas, chegou-se aos valores expostos na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Caracterização da corrente drenada pela carga.

| | |
|---|---------|
| Corrente eficaz | 8,31 A |
| Fator de potência | 0,282 |
| Magnitude da corrente na frequência fundamental | 11,47 A |
| Magnitude da corrente na terceira harmônica | 1,46 A |
| Magnitude da corrente na quinta harmônica | 0,087 A |

É importante salientar que há deslocamento de fase da terceira e quinta harmônica em torno de 90 graus em relação à harmônica fundamental de corrente.

Assim, a carga pode ser caracterizada por três fontes de corrente em paralelo, cada uma representando uma componente harmônica, como exemplificado na Figura 5.2.

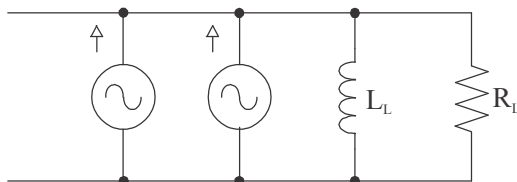


Figura 5.2: Modelagem da carga.

Os resultados da simulação da carga, cuja representação foi explicitada na Figura 5.2, utilizando os dados da Tabela 5-1, estão exibidos na Figura 5.3.

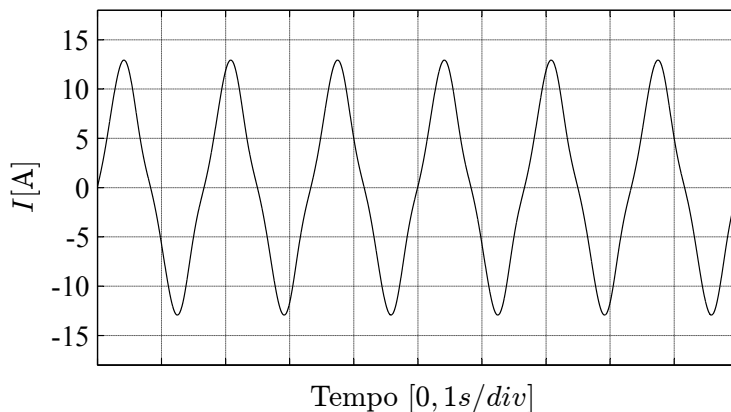


Figura 5.3: Resultados de simulação da corrente da carga.

Pode-se concluir que há uma representação confiável da drenagem de corrente da bomba hidráulica utilizando as fontes de corrente.

5.3 Modelagem do arranjo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos utilizados são fabricados pela *Kyocera*, modelo KD 250GT, com seus detalhes apresentados na Tabela 5-2, para condição padrão de teste.

Tabela 5-2: Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico *Kyocera* KD 250GT.

| | | |
|-----------------------------|----------|--------|
| Potência máxima | P_{mp} | 250 W |
| Tensão de máxima potência | V_{mp} | 29,8 V |
| Corrente de máxima potência | I_{mp} | 8,39 A |
| Tensão de circuito aberto | V_{ca} | 36,9 V |
| Corrente de curto circuito | I_{cc} | 9,09 A |

Para simulações, o *software* PSIM disponibiliza componentes capazes de emular arranjo fotovoltaico, bastando, para tanto, o correto

preenchimento dos parâmetros elétricos do módulo. A curva tensão & corrente do arranjo fotovoltaico utilizado pode ser visto na Figura 5.4.

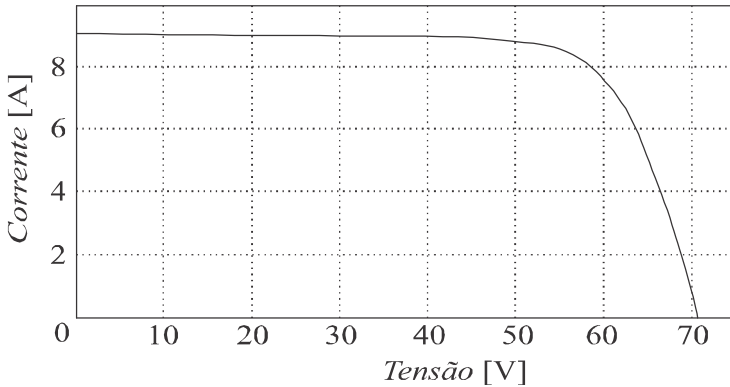


Figura 5.4: Curva simulada da tensão e corrente do arranjo fotovoltaico.

Após dimensionar a tensão de entrada e potência requerida no projeto, optou-se por utilizar dois módulos fotovoltaicos conectados em série, resultando nos parâmetros vistos na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico utilizado.

| | |
|-----------------------------|--------|
| Potência máxima | 500 W |
| Tensão de máxima potência | 59,6 V |
| Corrente de máxima potência | 8,39 A |
| Tensão de circuito aberto | 73,8 V |
| Corrente de curto circuito | 9,09 A |

5.4 Estratégia de controle da tensão V_{bar}

O objetivo da malha de controle do conversor Boost QTN consiste em manter a tensão de saída V_{bar} regulada no valor nominal do projeto. Por ora, as características da fonte de energia e da carga podem ser negligenciadas, sendo ambas substituídas por fonte de tensão e resistor, respectivamente.

Durante a elaboração da estratégia de controle do conversor, procurou-se o caminho de maior simplicidade e facilidade de implementação, decidindo-se pelo uso de controladores PI. Como a dinâmica da temperatura na superfície dos módulos é lenta, sua tensão

de saída também variará lentamente, permitindo empregar um compensador com baixa frequência de cruzamento.

O desenvolvimento da malha de controle foi executada através de análise de Bode, com posterior exportação através do método de Tustin para controle digital.

A função de transferência do conversor, obtida no APÊNDICE B, é apresentada em (5.1).

$$G_b(s) = \frac{-1,13 \cdot 10^3 s^3 + 2,18 \cdot 10^7 s^2 - 8,93 \cdot 10^{10} s + 6,93 \cdot 10^{14}}{50s^4 + 200s^3 + 2,81 \cdot 10^9 s^2 + 1,08 \cdot 10^{10} s + 7,28 \cdot 10^{12}} \quad (5.1)$$

A Figura 5.5 apresenta o diagrama de blocos da malha de controle de tensão V_{bar} utilizada.

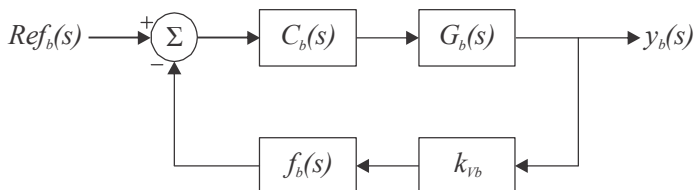


Figura 5.5: Malha para controle da tensão V_{bar} .

O bloco k_{Vb} representado na Figura 5.5 representa o sensor de tensão utilizado. A função de transferência do filtro passa-baixa do tipo Sallen-Key, representado como $f_b(s)$ e apresentada em (5.2), possui frequência de corte sintonizado f_{fb} em 1 kHz e coeficiente de amortecimento ζ_{fb} em 0,707.

$$f_b(s) = \frac{(2\pi f_{fb})^2}{s^2 + s4\pi\zeta_{fb}f_{fb} + 2\pi f_{fb}} \quad (5.2)$$

Assim, sabendo-se que a carga é conhecida e estática, pode-se alocar a frequência de cruzamento em 12 Hz e a margem de fase em 60° , resultando em um ganho estático k_b de $1,112 \times 10^{-3}$ e uma constante de tempo de T_b de 0,028 s, como pode ser visto em (5.3).

$$C_b(s) = k_b \frac{sT_b + 1}{sT_b} \quad (5.3)$$

O detalhamento dos cálculos encontra-se no APÊNDICE A.

5.4.1 Resultados de simulação do controle da tensão V_{bar}

Os resultados que comprovam a eficiência da malha de controle estão explicitados a seguir. Na Figura 5.6 apresenta-se a tensão e corrente de saída do conversor durante degraus de carga entre 50% e 100% da potência nominal.

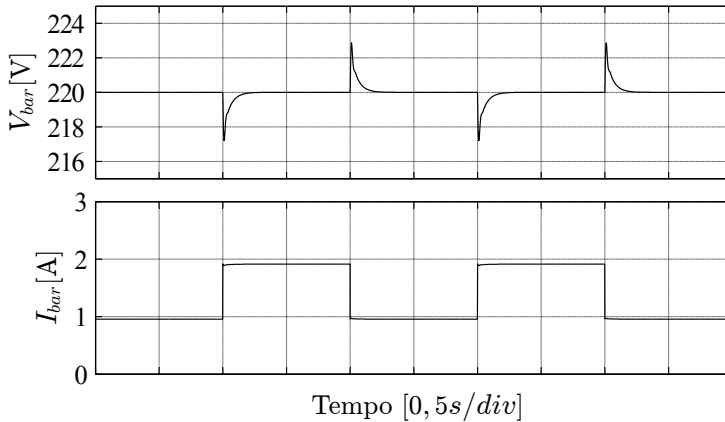


Figura 5.6: Comportamento da tensão V_{bar} e da corrente I_{bar} em resposta ao degrau de carga.

Na Figura 5.7 apresenta-se a regulação da tensão V_{bar} frente ao degrau de tensão V_{pv} .

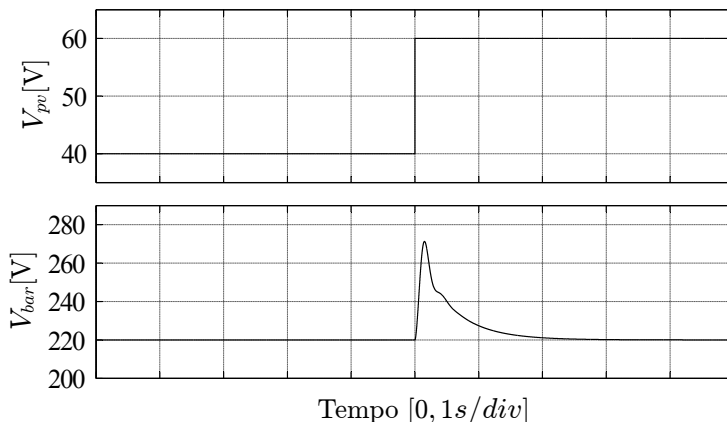


Figura 5.7: Degrau de tensão V_{pv} e tensão de saída V_{bar} .

A análise das Figura 5.6 e Figura 5.7 comprova o bom funcionamento da malha de controle da tensão. As simulações apresentam variações bruscas na carga e na tensão de entrada, sendo que são esperadas situações menos severas durante a operação do sistema.

5.5 Estratégia de controle de tensão V_o

O propósito da malha de controle do inversor é aplicar tensão senoidal na saída com amplitude de 110 V e 60 Hz. As particularidades da bomba hidráulica podem ser negligenciadas, tratando-a apenas como uma carga resistiva, assim como a tensão de saída do conversor Boost quadrático, tratada aqui como uma fonte de tensão regulada ideal.

Novamente, prezou-se pela simplicidade e facilidade de implementação do projeto, utilizando controlador do tipo PI. Devido à carga ser previamente conhecida, não se faz necessária utilização de compensadores mais sofisticados. A Figura 5.8 apresenta a malha de controle.

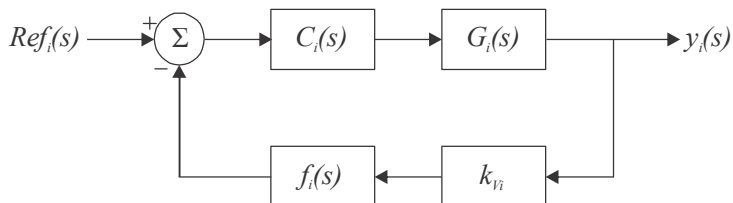


Figura 5.8: Representação da malha de controle da tensão V_o .

A função de transferência $G_i(s)$, obtida no APÊNDICE E, representando o modelo do inversor em ponte completa é explicitada em (5.4).

$$G_i(s) = \frac{VbarR_o}{s^2 L_f C_f R_o + s L_f + R_o} \quad (5.4)$$

A função de transferência do filtro passa-baixa do tipo Sallen-Key, representado na Figura 5.8 como $f_i(s)$ e apresentada em (5.5), possui frequência de corte sintonizado f_{fi} em 1000 Hz e amortecimento ζ_{fi} em 0,707.

$$f_i(s) = \frac{(2\pi f_{fi})^2}{s^2 + s 2\pi f_{fi} 2\zeta_{fi} + 2\pi f_{fi}} \quad (5.5)$$

Estabeleceu-se a frequência de cruzamento do compensador em 600 Hz, assim como a margem de fase em torno de 60°. Como resultado, obteve-se o ganho $k_i = 4,377 \times 10^{-3}$ e a constante de tempo $T_i = 5,513 \times 10^{-4}$ s.

$$C_i(s) = k_i \frac{sT_i + 1}{sT_i} \quad (5.6)$$

Mais detalhes sobre o desenvolvimento da malha de controle da tensão V_o são encontrados no APÊNDICE D.

5.5.1 Resultados de simulação do controle da tensão V_o

Os resultados de simulação têm como objetivo comprovar o correto desenvolvimento, tanto da modelagem do sistema, quanto da malha de controle utilizada.

Na Figura 5.9 observa-se a tensão de saída com forma e amplitude controlada.

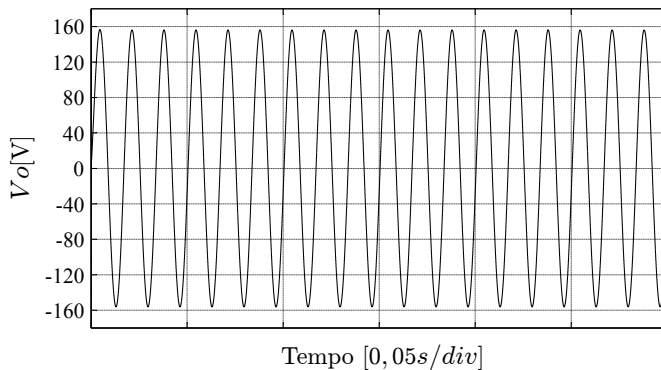


Figura 5.9: Tensão de saída V_o controlada.

Na Figura 5.10 observa-se a resposta da tensão a um degrau de carga resistiva, onde houve variação de 50% para 100% da potência de projeto.

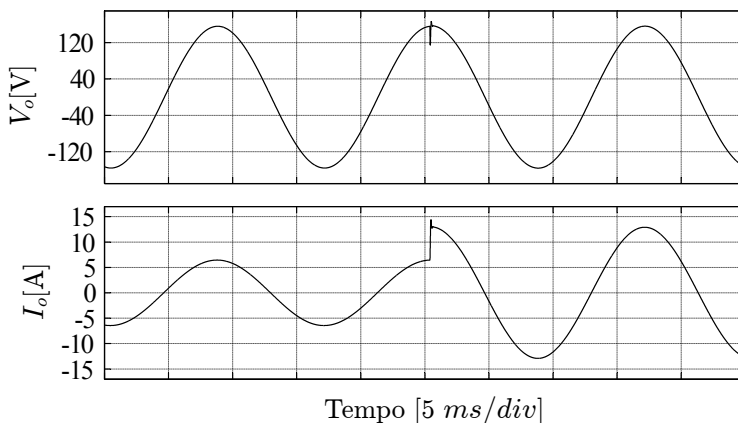


Figura 5.10: Degrau de carga e sua influência na tensão V_o e na corrente I_o .

Na Figura 5.11 a tensão nominal é aplicada a uma carga com as mesmas características de drenagem de corrente que a bomba vibratória, como desenvolvida no item 5.2.

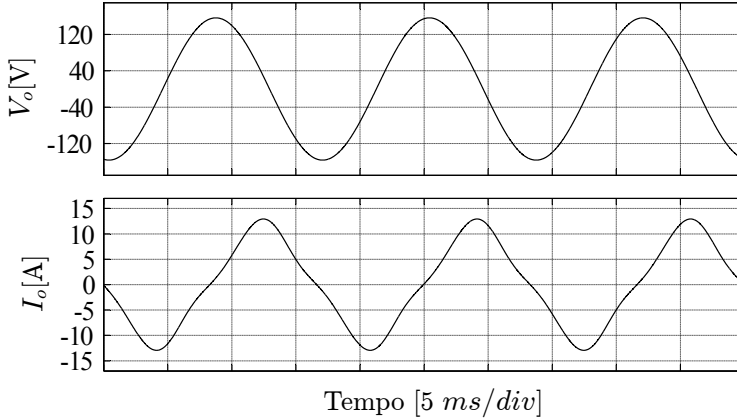


Figura 5.11: Tensão e corrente nominais utilizando o modelo da bomba vibratória.

5.6 Circuitos e sistemas adicionais do sistema

O esquemático da placa de potência, assim como o *layout* da placa, foi desenvolvido no *software Altium*, ambos exibidos no APÊNDICE G. Os indutores foram produzidos no próprio laboratório, assim como a montagem do circuito de alimentação auxiliar.

A placa de condicionamento e controle foi produzida da mesma forma, entretanto foi conectada a ela o *kit* de desenvolvimento da *Texas Instrument*, modelo “C2000 Picollo LaunchPad”. Os detalhes estão expostos no APÊNDICE H.

5.6.1 Limitação do ganho estático do conversor Boost QTN

A análise da Figura 2.17, repetida em Figura 5.12 por comodidade, traz consigo algumas considerações importantes que devem ser levadas em consideração durante as rotinas de operação do estágio elevador de tensão, detalhadas a seguir.

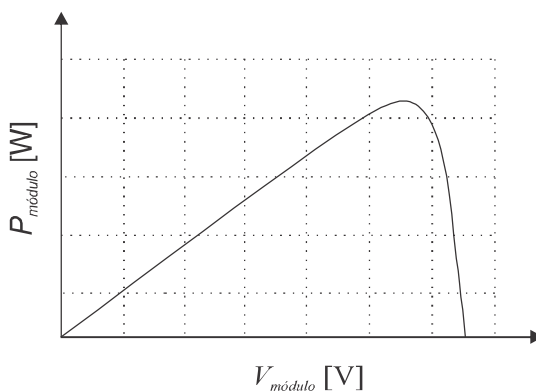


Figura 5.12: Relação entre a tensão e a potência de um arranjo genérico.

Retomando as conclusões explanadas em 2.3, existe apenas um ponto de operação de máxima potência do arranjo fotovoltaico. Para qualquer potência diferente, existem dois valores de tensão possíveis, conclusão obtida da observação da Figura 5.12.

O sistema de bombeamento de água apresentado nessa dissertação é isolado e possui carga fixa. Isso significa que o arranjo fotovoltaico deve gerar energia suficiente apenas para o acionamento da carga adicionando-se as perdas do sistema. Em outras palavras, a operação do módulo no ponto de máxima potência não é desejada, possibilitando ao conjunto operar em qualquer ponto da curva da Figura 5.12.

Desconsiderando a possibilidade do sistema operar coincidentemente no ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico, existem duas regiões de atuação do módulo, ilustradas na Figura 5.13.

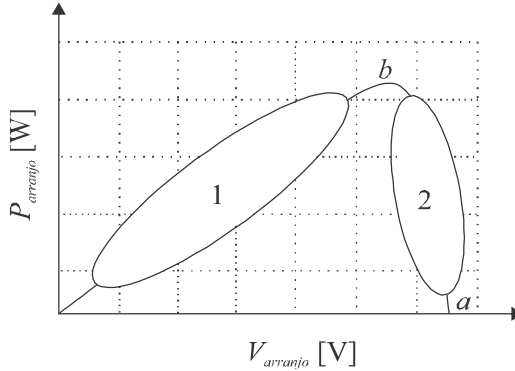


Figura 5.13: Regiões de operação possíveis.

Tanto a área 1 quanto a área 2 são capazes de fornecer potência suficiente, então deve-se limitar a operação na região que favoreça o funcionamento do sistema. A fim de reduzir o ganho estático requerido do conversor elevador, reduzindo esforços e perdas, a escolha natural é limitar o funcionamento do conversor a região 2.

Para tanto, dota-se o controlador de meios capazes de identificar a região em que opera. Utilizaram-se os princípios do método de rastreamento de máxima potência baseado na medição da temperatura do módulo fotovoltaico [36], que relaciona a tensão de máxima potência com a temperatura da superfície do módulo da seguinte forma:

$$V_{mpp}(T) = V_{mpp}(T_{ref}) + u_{Vmpp}(T - T_{ref}) \quad (5.7)$$

Explicitando o ganho estático do conversor elevador em (5.8).

$$G_B = \frac{V_{bar}}{V_{pv}} \quad (5.8)$$

Durante o período de inatividade do sistema de bombeamento, o arranjo está em situação de circuito aberto (V_{ca}), ou seja, a tensão V_{pv} é igual V_{ca} . Pelas características do conversor utilizado, a tensão de saída V_{bar} é igual à tensão de entrada V_{pv} , desconsiderando as perdas e quedas de tensão.

Durante a partida, o conversor Boost QTN eleva a tensão V_{bar} , partindo de V_{ca} objetivando alcançar o valor nominal da tensão de

barramento. Dessa forma, o ponto de operação parte de “a” no sentido “a b” pela região 2 da Figura 5.13.

A tensão de máxima potência (V_{mp}) é a mínima tensão possível de operação, representada como o ponto “b” da Figura 5.13. Caso o ponto de operação de máxima potência tenha sido atingido sem estabilização da tensão V_{bar} , o sistema entra em modo de desativação, pois não há geração de energia fotovoltaica suficiente para acionar a bomba.

Como não há medição da tensão V_{pv} , esse controle é feito de forma indireta pelo ganho do conversor. Como a mínima tensão admissível de V_{pv} é a tensão de máxima potência do arranjo V_{mp} , é determinado o máximo ganho do conversor elevador em relação a tensão nominal do barramento V_{bar} para a temperatura do arranjo naquele instante, como demonstrado em (5.9) e (5.10).

$$G_{BoostMax}(T) = \frac{220V}{V_{mpp}(T)} \quad (5.9)$$

$$G_{BoostMax}(T) = \frac{220V}{V_{mp}(T_{ref}) + u_{Vmpp}(T - T_{ref})} \quad (5.10)$$

Assim, caso haja necessidade de exceder o ganho máximo determinado em (5.10) para V_{bar} atingir 220 V, o arranjo fotovoltaico não é capaz de gerar energia suficiente para alimentar o sistema, conseqüentemente o controlador entra em modo de desligamento.

5.6.2 Banco resistivo

Foi adicionado ao projeto um banco resistivo capaz de se conectar ao barramento cc. Desta forma, os processos de estabilização da tensão V_{bar} e verificação potência suficiente para acionamento da bomba são simplificados.

Durante a inicialização do sistema, o microcontrolador conecta o banco resistivo ao barramento cc. Com o inversor ainda inativo, o estágio elevador tende a ajustar a tensão V_{bar} em seu valor nominal. Como o resistor é dimensionado para consumir a mesma potência que a bomba hidráulica consumiria em operação, V_{bar} estabilizar-se-á apenas se houver capacidade do arranjo fotovoltaico em gerar energia suficiente para alimentar a carga. Com o barramento cc estabilizado, o inversor é

acionado, o banco resistivo é desconectado e o sistema passa a operar integralmente.

Caso as condições de radiação e temperatura não permitam a estabilização da tensão V_{bar} , o conversor Boost QTN é desativado. Novas tentativas de acionamento do sistema são executadas periodicamente até encontrar condições ambientais favoráveis.

O conjunto completo é visualizado na Figura 5.14, sendo que 1 denota o arranjo fotovoltaico, 2 o estágio elevador de tensão, 3 o banco resistivo controlado, 4 o estágio inversor, 5 o filtro LC e 6 a bomba vibratória. A linha “a” representa a leitura da temperatura do arranjo, “b” o controle dos semicondutores do estágio elevador, “c” o comando do banco de resistores comandados, “d” o sinal de tensão do barramento cc, “e” a razão cíclica do estágio inversor e “f” a leitura da tensão de saída senoidal.

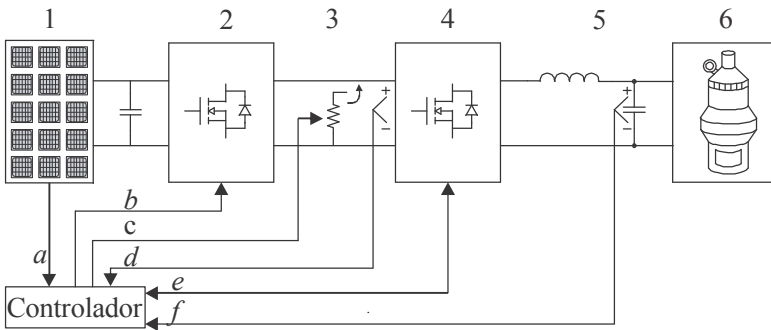


Figura 5.14: Visão geral do sistema.

5.6.3 Rotina de tomada de decisão do controlador

Foram criadas rotinas desenvolvidas em linguagem de programação responsáveis pelas tomadas de decisão do sistema. Elas são responsáveis pela conexão e desconexão do banco resistivo ao barramento cc, supervisão do ganho do conversor elevador, ativação e desativação de forma independente dos dois estágios.

Essas rotinas são expostas de maneira simplificada na Figura 5.15, estando explicitadas em linguagem de programação no APÊNDICE I.

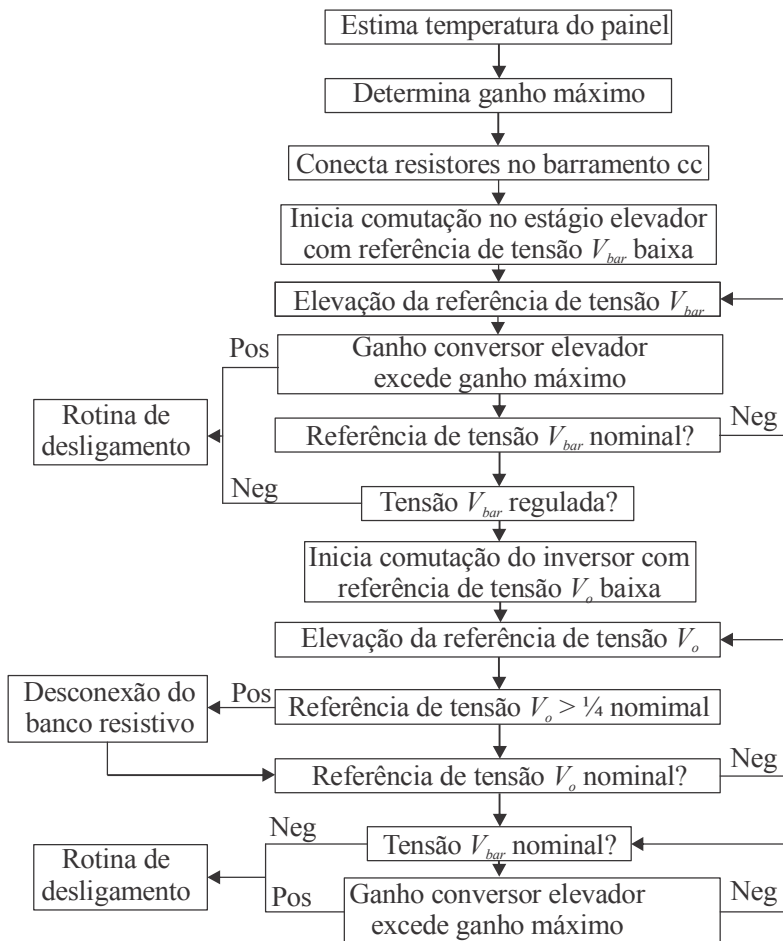


Figura 5.15: Rotinas de tomada de decisão.

5.7 Protótipo

As fotos a seguir exibem o protótipo construído. A Figura 5.16 apresenta a visão geral do protótipo, composta da fonte auxiliar, placa de condicionamento e controle, banco resistivo controlado e placa de potência.

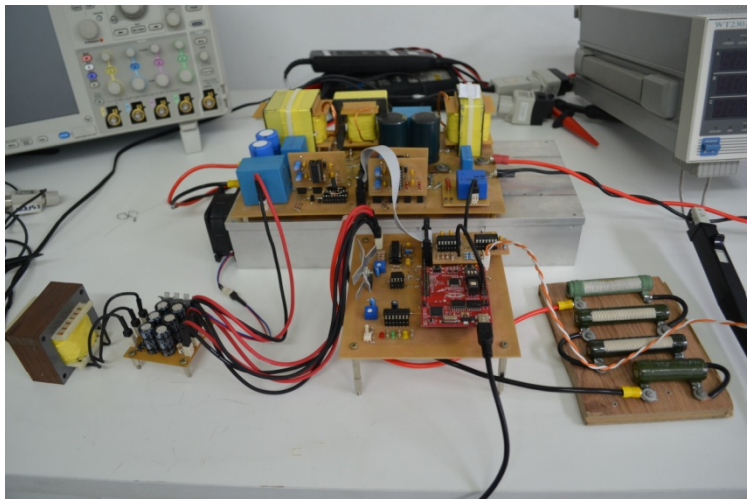


Figura 5.16: Vista geral do protótipo.

A Figura 5.17 exibe em detalhes a placa de potência confeccionada.

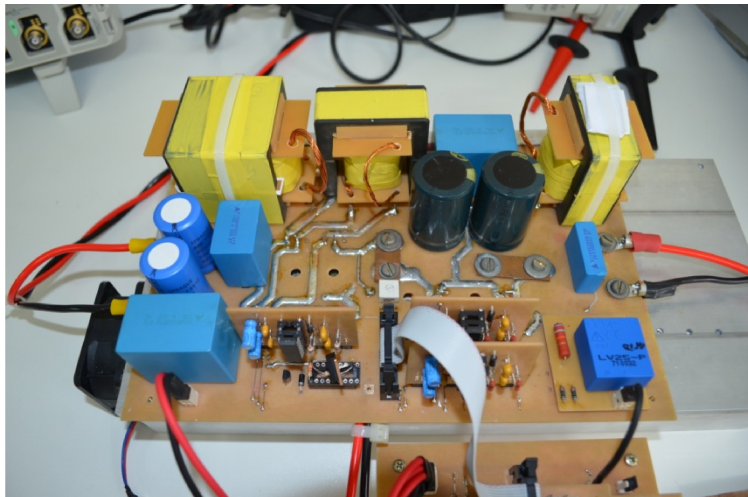


Figura 5.17: Placa de potência.

Na Figura 5.18 encontra-se a placa de condicionamento e controle, composta pelos circuitos analógicos e o controlador digital.



Figura 5.18: Placa de condicionamento e controle.

A Figura 5.19 exibe o esquema desenvolvido para testes com bomba vibratória.



Figura 5.19: Bomba vibratória utilizada para testes.

5.8 Resultados de simulação e experimentais

Os resultados de simulações e experimentais apresentados a seguir expõem o funcionamento do estágio elevador e inversor, além das malhas de controle de tensão. Posteriormente, as rotinas de ativação e desativação do sistema são apresentadas.

5.8.1 Tensão V_{bar}

Os dados a seguir ilustram o adequado funcionamento do conversor Boost QTN operando sob tensão e corrente nominais alimentando uma carga resistiva. Os resultados podem ser conferidos na Figura 5.20 e Figura 5.21, respectivamente.

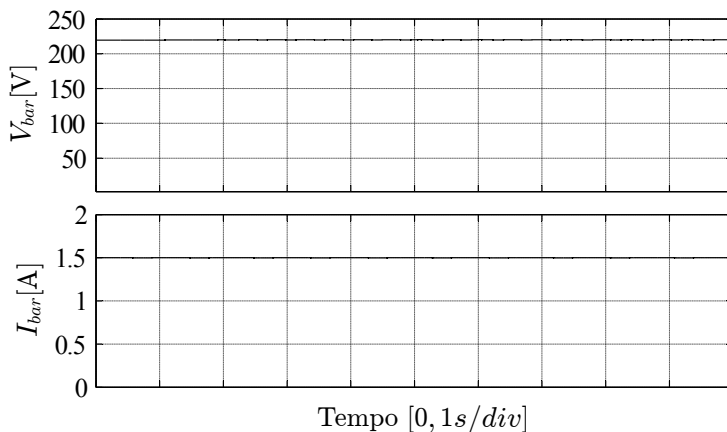


Figura 5.20: Tensão e corrente de saída do conversor Boost QTN (simulada).

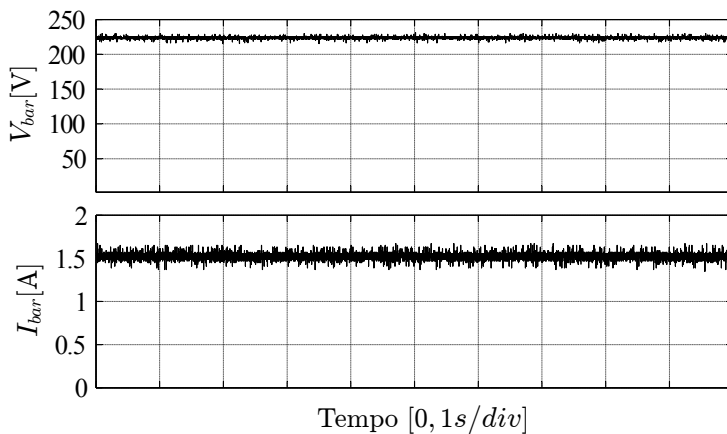


Figura 5.21: Tensão e corrente no conversor Boost QTN (resultados experimentais).

As Figura 5.22 e Figura 5.23 evidenciam a capacidade da malha de controle da tensão de saída à variação brusca de carga.

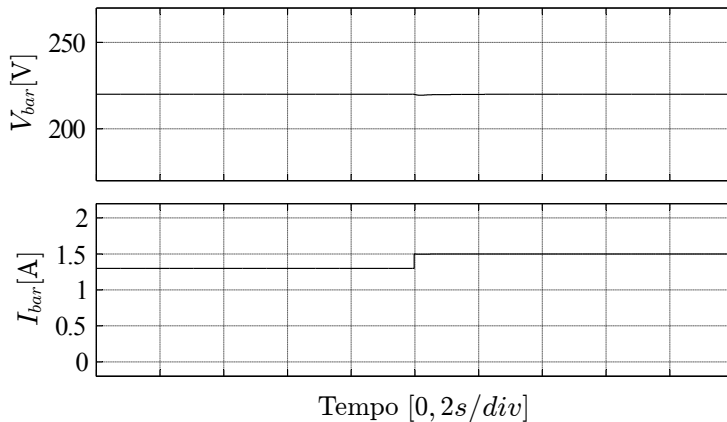


Figura 5.22: Comportamento da tensão e corrente com degrau de carga (simulação).

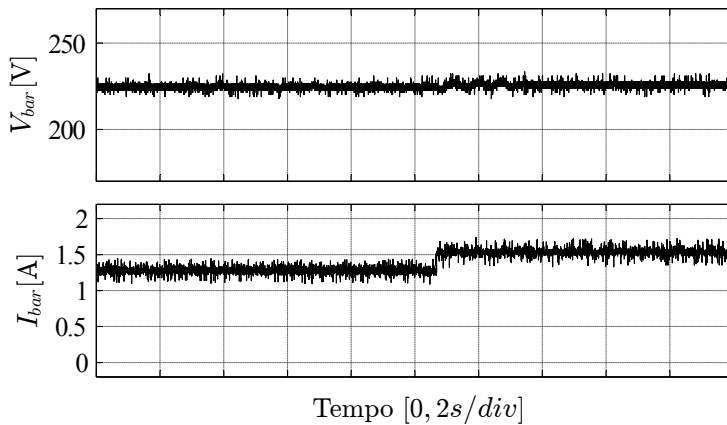


Figura 5.23: Comportamento da tensão e corrente com degrau de carga (resultados experimentais).

A curva de rendimento do conversor, obtida através do medidor de potência *Yokogawa WT230*, é exibida na Figura 5.24.

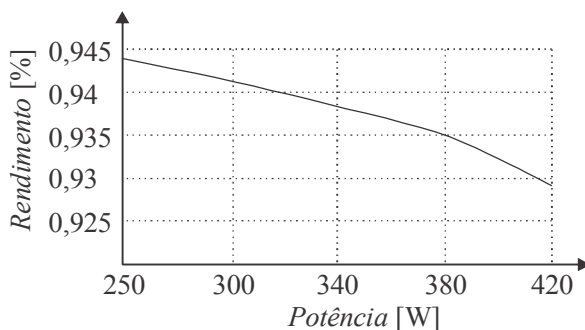


Figura 5.24: Curva de rendimento do conversor Boost QTN.

5.8.2 Tensão V_o

A seguir, são apresentadas formas de onda obtidas experimentalmente que demonstram a capacidade do compensador em manter tensão senoidal independentemente da carga. A Figura 5.25 e a Figura 5.26 apresentam o conversor operando sob tensão e corrente nominais alimentando carga resistiva.

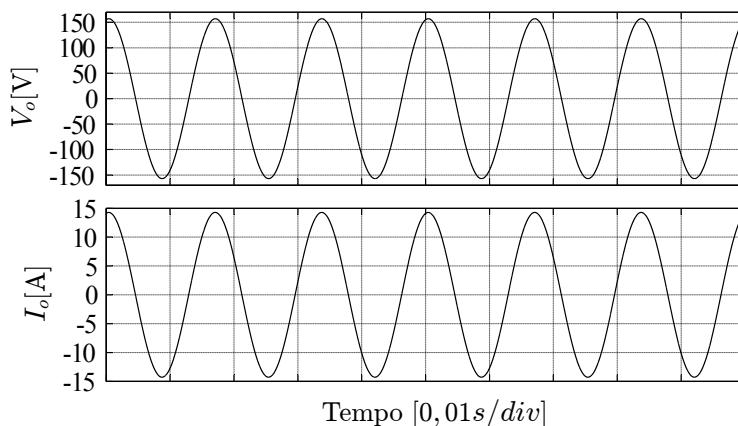


Figura 5.25: Tensão e corrente de saída do estágio inversor alimentado carga resistiva (simulação).

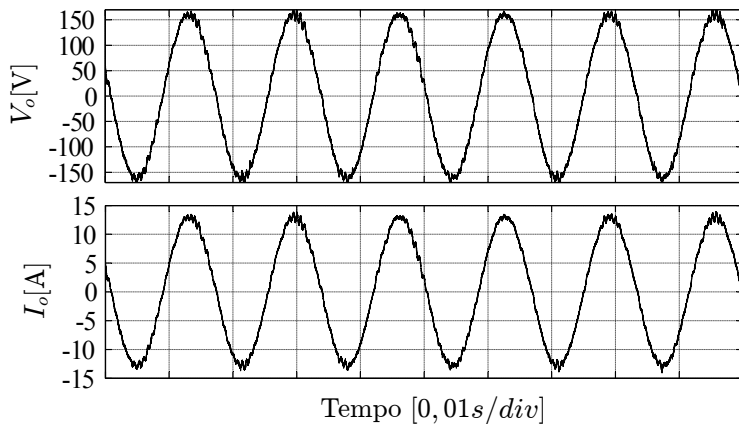


Figura 5.26: Tensão e corrente de saída do conversor inversor alimentando a carga resistiva (resultados experimentais).

Com as Figura 5.27 e Figura 5.28 é possível comparar os valores obtidos através simulação e experimentais, nesta ordem. Observa-se que as formas de ondas e amplitude das mesmas são idênticas.

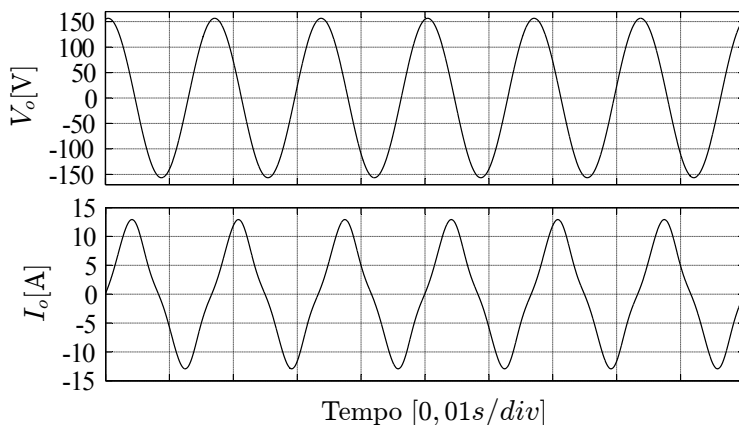


Figura 5.27: Tensão e corrente na bomba sendo alimentada pelo conversor (simulação).

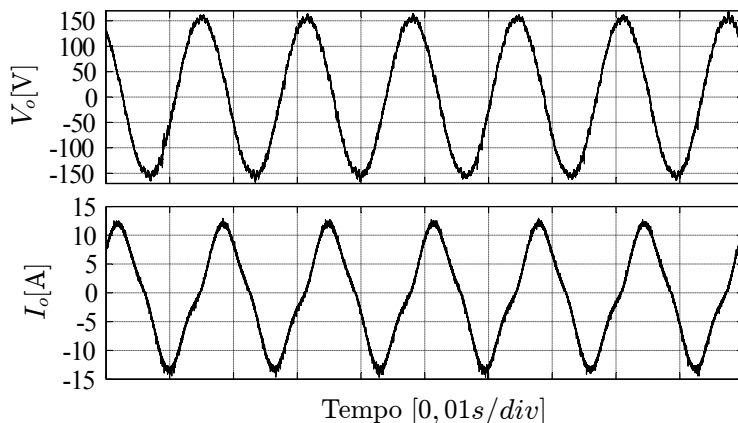


Figura 5.28: Tensão e corrente aplicado na bomba pelo inversor (resultados experimentais).

A Figura 5.29 expõe a curva de rendimento do inversor para diversos níveis de carga obtidos com o medidor de potência WT230 da fabricante Yokogawa.

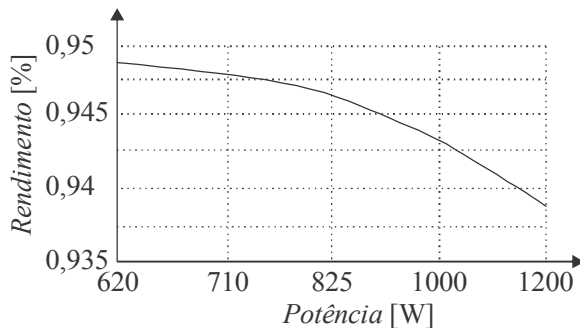


Figura 5.29: Curva de rendimento do inversor.

5.8.3 Operação dos estágios em cascata

Após vários testes realizados individualmente, que certificaram o funcionamento adequado dos estágios funcionando de forma isolada, procedeu-se a interligação entre os dois conversores. A Figura 5.30 exibe o comportamento da tensão do arranjo fotovoltaico, do barramento cc e a tensão aplicada na bomba hidráulica em regime permanente.

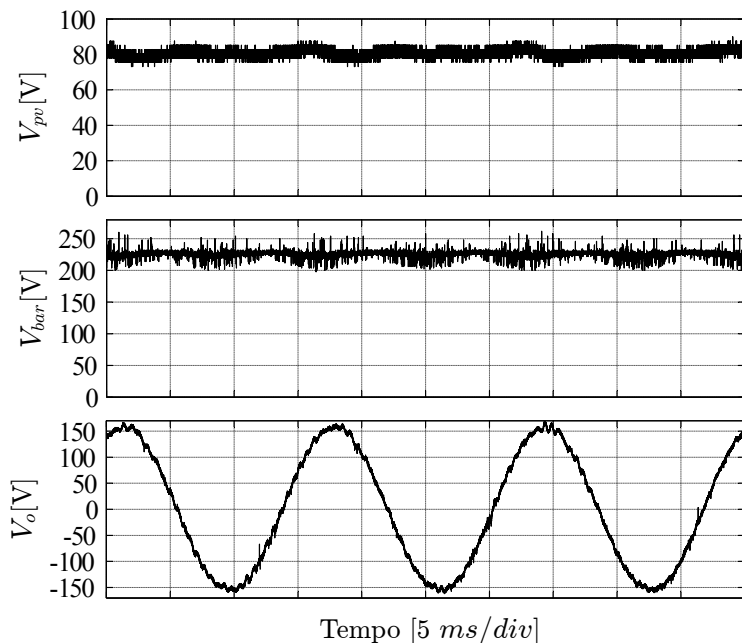


Figura 5.30: Tensão no arranjo fotovoltaico, barramento cc e na carga.

A distorção harmônica total da tensão V_o foi de 3,82%.

5.8.4 Inicialização do sistema

Como um dos objetivos do sistema é o funcionamento autônomo, foi desenvolvido um algoritmo capaz de testar a capacidade de geração de energia fotovoltaica suficiente para operar o sistema. Se os fatores ambientais forem favoráveis, o procedimento de acionamento da carga é iniciado. Caso contrário, o sistema é desligado.

5.8.4.1 Inicialização com potência suficiente

Durante a inicialização do sistema com potência suficiente, o estágio elevador é acionado, elevando gradativamente a tensão de saída até o valor nominal. Após este período, o estágio inversor é ativado, aplicando tensão senoidal na carga com amplitude controlada até a tensão nominal. Um segundo após a partida do estágio inversor, a carga resistiva é desconectada do barramento cc. O resultado é visto na Figura 5.31.

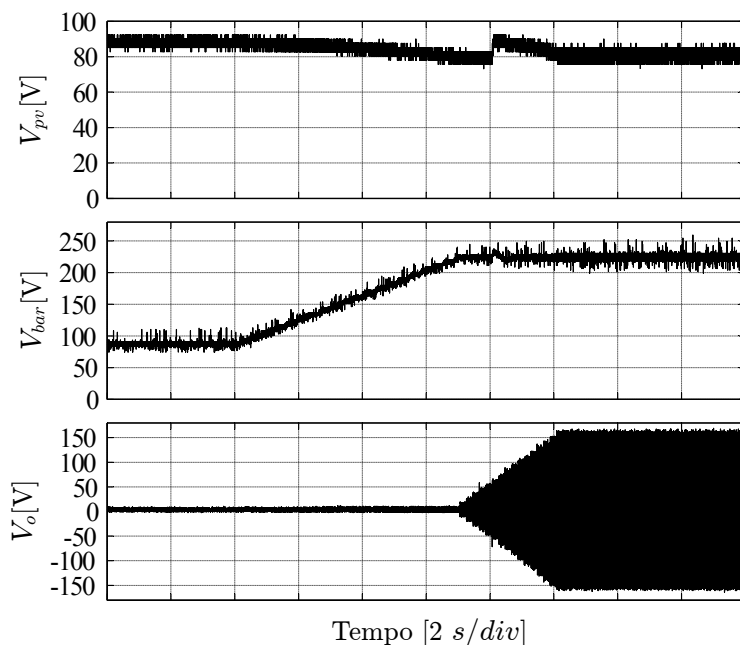


Figura 5.31: Tensão no arranjo fotovoltaico, no barramento cc e na carga durante o acionamento do sistema fotovoltaico.

5.8.4.2 Inicialização com potência insuficiente

Conforme mencionado, existe a possibilidade de fatores ambientais não favoráveis impedirem o acionamento da carga. Um exemplo do comportamento do sistema nessa situação é visto na Figura 5.32.

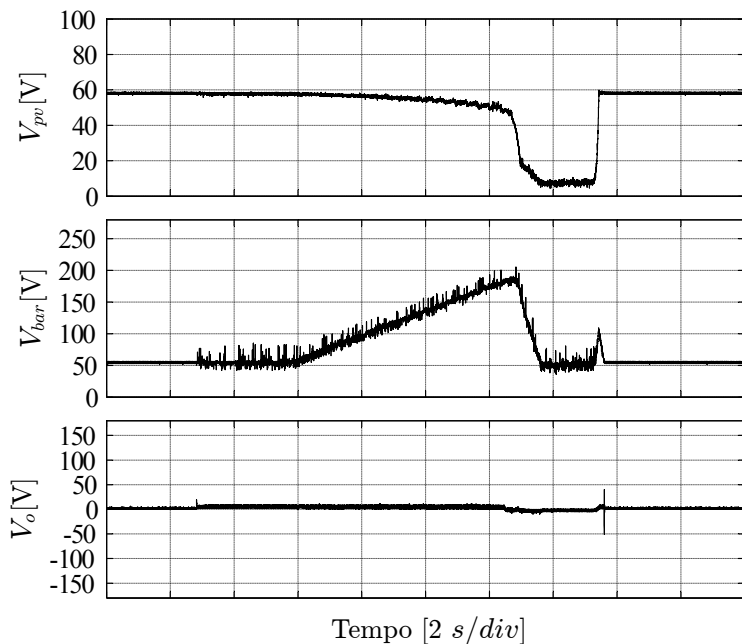


Figura 5.32: Tensão no arranjo, barramento cc e na carga durante acionamento do sistema com geração fotovoltaica insuficiente.

Após a tentativa fracassada de elevação da tensão V_{bar} , onde o ganho requerido pelo conversor elevador requerido é maior que o ganho determinado pela temperatura na superfície do módulo fotovoltaico, o sistema entra em modo de desligamento, reduzindo a referência de tensão do barramento cc.

5.8.4.3 Desligamento por potência insuficiente

Durante a redução da potência gerada pelo arranjo fotovoltaico, o sistema entra em processo de desligamento, como ilustrado da Figura 5.33.

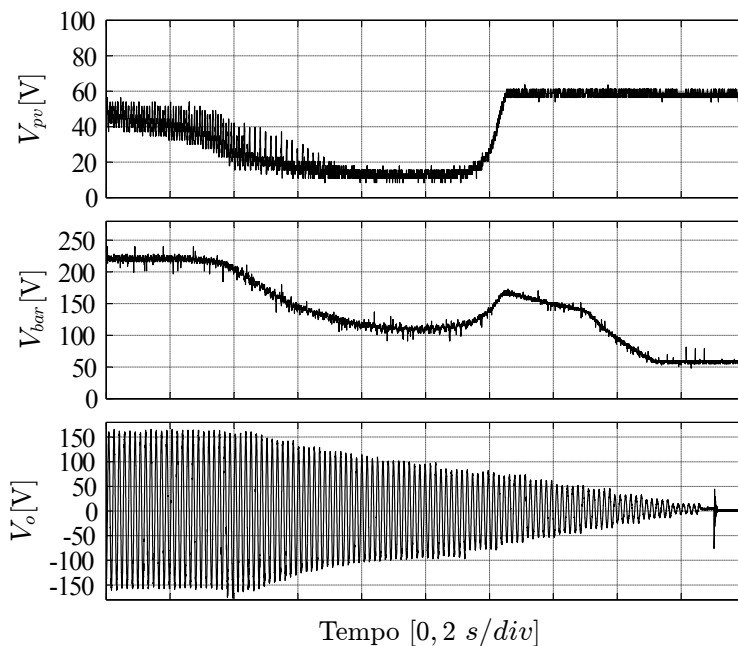


Figura 5.33: Tensão no arranjo, no barramento cc e na carga durante o desligamento do sistema.

5.9 Conclusão

Os dados obtidos a partir da experimentação mostram que os resultados almejados foram alcançados. Comprova-se que a regulação de tensão tanto do barramento cc quanto a tensão de saída senoidal comportam-se de forma adequada.

Além disso, a autonomia do conversor ao entrar e sair de operação de forma suave foi documentada, conferindo ao conjunto capacidade de operar de forma satisfatória sem intervenção humana.

6 CONCLUSÃO GERAL E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foram apresentados os procedimentos adotados para o desenvolvimento de um sistema de bombeamento de água capaz de operar nas regiões remotas do norte e nordeste, onde não há rede de distribuição de energia. Para tanto, características como robustez, eficiência e baixo custo foram levadas em consideração em todas as etapas do projeto. Assim, o desenvolvimento de um conjunto baseado em fonte renovável de energia, utilizando topologias com ampla utilização, sistemas de controle simplificados, capazes de operar com bom rendimento, foram alcançados.

O primeiro capítulo tratou da contextualização e motivação do projeto, sendo levantadas as características de clima e solo da região nordeste do país. Além disso, exploraram-se os projetos governamentais que visam universalizar o fornecimento de energia elétrica a todas as famílias. Visto isso, determinaram-se as características necessárias para um conjunto operar na região que se destina.

O segundo capítulo objetivou familiarizar o leitor com os conceitos abordados nos capítulos seguintes, que serão recorrentes e necessários para o bom entendimento das decisões adotadas no decorrer do projeto.

O terceiro capítulo apresenta a topologia do estágio elevador de tensão escolhido e a modulação empregada. A modelagem do conversor por valores médios com perdas foi desenvolvida e a limitação de ganho estático do conversor determinada. A partir disso, a região de operação foi traçada e os esforços de tensão e corrente dos componentes dimensionados. Por fim, apresentam-se as formas de onda dos testes preliminares do protótipo.

O quarto capítulo, destinado ao estágio inversor, traz a topologia básica empregada. A modulação utilizada foi explorada, assim como o filtro de saída utilizado. O dimensionamento do conversor foi exposto, assim como os esforços de tensão e corrente que os componentes são submetidos. Por fim, apresentou-se o resultado dos testes com o protótipo desenvolvido.

O quinto capítulo tratou da construção e operação do protótipo. Uma breve modelagem da carga foi apresentada com o intuito de se obter resultados de simulação mais realistas. A estratégia de controle da tensão de saída dos dois estágios foi exposta. A partir disso, apresenta-se o método utilizado para limitar a faixa de operação do conversor a partir da medição da temperatura do módulo. Os resultados de simulações e experimentais do estágio elevador e inversor são apresentados para

comparação, seguidos dos resultados experimentais do conjunto operando conectado à fonte fotovoltaica alimentando a bomba hidráulica. Por fim, foi apresentado o comportamento do conversor entrando em operação com condições ambientais favoráveis e desfavoráveis. Assim, comprovou-se a capacidade do conjunto de atender aos requisitos apresentados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ressalta-se que a carência absoluta, sem fornecimento de água e energia elétrica, ainda é a realidade de uma grande quantidade de brasileiros, por isso, iniciativas com o objetivo de mitigar esses problemas devem ser levadas em consideração, mesmo que tragam solução paliativa enquanto busca-se fornecer eletricidade a todas as famílias que ainda convivem com essa situação. Acredita-se que o sistema aqui exposto possui capacidade de figurar como solução viável na sua faixa de potência.

Adicionalmente, visualiza-se a capacidade de o conjunto operar no fornecimento de energia a cargas diversas devido à versatilidade do conjunto. Soluções para pecuária extensiva ou alimentação de pequenas cargas em quiosques ou aplicações turísticas são vistas como as mais promissoras.

O autor sugere algumas propostas de trabalhos futuros que poderia complementar os resultados obtidos:

- Testar os limites máximos e mínimos de tensão que permitem o funcionamento satisfatório da bomba hidráulica.
- Testar os limites máximos e mínimos da frequência da tensão de alimentação que permitem o funcionamento satisfatório da bomba vibratória.
- Mensurar a vazão obtida com o equipamento para as diversas combinações de tensão e frequência possíveis.
- Desenvolvimento de um algoritmo capaz de aliar a variação da tensão no barramento e na bomba vibratória.
- Estudo da viabilidade de inicialização do estágio elevador e inversor simultaneamente, tornando desnecessário o uso do banco resistivo controlado.

REFERÊNCIAS

- [1] Rio +20. Un (Org.). The Future We Want: Water for the World. Disponível em: <<http://www.un.org/en/sustainablefuture/water.shtml#facts>>. Acesso em: 16 jul. 2013.
- [2] Ministério das Cidades (Org.). Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=101>>. Acesso em: 16 jul. 2013.
- [3] J. Suassuna, Semi-árido: Proposta de convivência com a seca. 2002. Disponível em: <http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=659&Itemid=376>. Acesso em: 06 mar. 2014.
- [4] J. Suassuna, O PDCT e a pequena irrigação no nordeste. Disponível em: <http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=781&Itemid=376>. Acesso em: 06 mar. 2014.
- [5] D. M. Vieira, “Obstáculos à universalização do acesso ao serviço público de distribuição de energia elétrica no meio rural brasileiro,” Dissertação de mestrado, Curso de Especialização em Controle da Regulação, Instituto Serzedello Corrêa, Tribunal de Contas da União, Brasília, 2011.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica (Org.). Audiência Pública nº 115: Minuta da Resolução.. 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/dspListaDetalhe.cfm?attAnoAud=2010&attIdeFasAud=507&id_area=13&attAnoFasAud=2011>. Acesso em: 07 mar. 2014.
- [7] Chikh, A.; Chandra, A., "Optimization and control of a photovoltaic powered water pumping system," *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, pp.1,6, 22-23 Oct. 2009
- [8] Bhat, S. R.; Pittet, A.; Sonde, B. S., "Performance Optimization of Induction Motor-Pump System Using Photovoltaic Energy

Source," *IEEE Transactions on Industry Applications*, , vol.IA-23, no.6, pp.995,1000, Nov. 1987

- [9] Appelbaum, J., "Starting and Steady-State Characteristics of DC Motors Powered by Solar Cell Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.EC-1, no.1, pp.17,25, March 1986.
- [10] Alghuwainem, S.M., "Matching of a DC motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.9, no.1, pp.192,198, Mar 1994
- [11] Malla, S. G.; Bhende, C. N.; Mishra, S., "Photovoltaic based water pumping system," *International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS)*, pp.1,4, 28-30 Dec. 2011
- [12] Nayar, C. V.; Vasu, E.; Phillips, S.J., "Optimised solar water pumping system based on an induction motor driven centrifugal pump," *TENCON '93. Conference on Proceedings. Computer, Communication, Control and Power Engineering.*, pp.388,393 vol.5, 19-21 Oct 1993
- [13] Katan, R.E.; Agelidis, V.G.; Nayar, C.V., "Performance analysis of a solar water pumping system," *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996.*, vol.1, pp.81,87 vol.1, 8-11 Jan 1996
- [14] Liebenberg, R.; Enslin, J. H R; van der Merwe, F.S., "High efficiency, long life actuator for PV water pumping applications," *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993.*, pp.495,500 vol.5, 13-16 Sep 1993
- [15] Muljadi, E.; Taylor, R., "PV water pumping with a peak power tracker using a simple six step square wave inverter," *Thirty-First IAS Annual Meeting, Industry Applications Conference*, vol.1, pp.133,142 vol.1, 6-10 Oct 1996
- [16] Taha, M.S.; Suresh, K., "Maximum power point tracking inverter for photovoltaic source pumping applications," *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Proceedings of the 1996*, vol.2, pp.883,886 vol.2, 8-11 Jan 1996

- [17] Chacko, R.V.; Sreekumari, B.; Fathima, K. A.; Lakaparampil, Z.V., "High performance AC drive for solar pumps," *International Conference on Industrial Technology. Proceedings of IEEE*, vol.1, pp.600,605 vol.2, 19-22 Jan. 2000
- [18] Vongmanee, V., "The photovoltaic pumping system using a variable speed single phase induction motor drive controlled by field oriented principle," *The 2004 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, 2004. Proceedings.*, vol.2, pp.1185,1188 vol.2, 6-9 Dec. 2004
- [19] Vitorino, M.A.; Correa, M. B R, "High performance photovoltaic pumping system using induction motor," *Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian*, pp.797,804, Sept. 27 2009-Oct. 1 2009
- [20] Mansouri, M. N.; Mimouni, M.F.; Annabi, M., "Vectorial command of an asynchronous motor supplied by a photovoltaic generator," *International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol.5, pp.5 pp. vol.5, 6-9 Oct. 2002
- [21] Castro, R., Energias renováveis e produção descentralizada: "Introdução a energia fotovoltaica". Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2002. Disponível em: <http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/Introducao_a_Energia_Fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2014.
- [22] Dondi, D.; Bertacchini, A.; Brunelli, D.; Larcher, L.; Benini, L., "Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.55, no.7, pp.2759,2766, July 2008
- [23] R. F. Coelho. "Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaico," Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [24] R. F. Coelho. "Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaico," Dissertação de mestrado, Departamento de

Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

- [25] Suntio, T.; Leppäaho, J.; Huusari, J.; Nousiainen, L., "Issues on Solar-Generator Interfacing With Current-Fed MPP-Tracking Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.25, no.9, pp.2409,2419, Sept. 2010
- [26] Kyocera Solar, Inc. Kyocera solar: Specifications. 2013. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5133.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2014.
- [27] R. Da Silva, W. de Paiva, Bombas Hidráulicas. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVdcAD/bombas-hidraulicas>>. Acesso em: 17 mar. 2014.
- [28] Araujo, S.V.; Zacharias, P.; Sahan, B.; Torrico Bascope, R.P.; Antunes, F. L M, "Analysis and proposition of a PV module integrated converter with high voltage gain capability in a non-isolated topology," *7th International Conference on Power Electronics, ICPE '07.*, pp.511,517, 22-26 Oct. 2007
- [29] Weichen Li; Xin Xiang; Chushan Li; Wuhua Li; Xiangning He, "Interleaved High Step-Up ZVT Converter With Built-In Transformer Voltage Doubler Cell for Distributed PV Generation System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.28, no.1, pp.300,313, Jan. 2013
- [30] Chakraborty, S.; Sensarma, P., "High gain high efficiency front end resonant dc-dc boost converter for PV microinverter," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp.180,187, 15-20 Sept. 2012
- [31] Kadri, R.; Gaubert, J-P; Champenois, G.; Mostefai, M., "Performance analysis of transformless single switch quadratic boost converter for grid connected photovoltaic systems," *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp.1,7, 6-8 Sept. 2010
- [32] Ping Yang; Jianping Xu; Guohua Zhou; Shiyu Zhang, "A new quadratic boost converter with high voltage step-up ratio and

- reduced voltage stress, "*7th International Conference on Power Electronics and Motion Control (IPEMC)*, vol.2, pp.1164,1168, 2-5 June 2012
- [33] De Novaes, Y.R.; Rufer, A.; Barbi, I., "A New Quadratic, Three-Level, DC/DC Converter Suitable for Fuel Cell Applications, "*Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, pp.601,607, 2-5 April 2007
- [34] M. G. Bottarelli, "Conversores cc-cc básicos não-isolados quadráticos de três níveis," 2006. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [35] D. C. Martins, I. Barbi, *Eletrônica de Potência: Introdução ao estudo de conversores cc-ca*. 2. ed. Florianópolis: Baía dos Limões Ltda, 2008. 489 p.
- [36] Coelho, R.F.; Concer, F.M.; Martins, D.C., "A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems, "*9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2010, pp.1,6, 8-10 Nov. 2010
- [37] Coelho, R. F.; Schweitzer, R.; Martins, D. C., "*Obtenção de modelos médios para grandes sinais voltados à simulação de conversores estáticos*". Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. CBA 2012,2012.

APÊNDICE A

Dimensionamento Boost QTN Quadrático Três níveis

Requisitos de projeto

| | |
|-------------------------------------|--|
| $V_{inMin} := 37.2V$ | Tensão mínima de entrada |
| $V_{inMax} := 56.8V$ | Tensão máxima de entrada |
| $P_{Nom} := 280W$ | Potência nominal |
| $P_o := 150\% \cdot P_{Nom} = 420W$ | Projeto dimensionado para potência 50% maior que a potência da bomba |
| $V_o := 200V$ | Tensão de saída |
| $f_s := 50kHz$ | Frequência de comutação |
| $T_s := f_s^{-1} = 20\mu s$ | |
| $V_{in} := 50V$ | Tensão utilizada para calculos |
| $\lambda := 0.875$ | Índice de condução da chave S1 em relação a S2 |
| $G_c := \frac{V_o}{V_{in}} = 4$ | Ganho do conversor |
| $V_{C2} := V_o$ | Tensão do Cap2 = Tensão de saída |

$$D := \frac{-\left(\frac{1 - \lambda - G_c - G_c \cdot \lambda}{G_c \cdot \lambda}\right) - \sqrt{\left(\frac{1 - \lambda - G_c - G_c \cdot \lambda}{G_c \cdot \lambda}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{G_c - 1}{G_c \cdot \lambda}\right)}}{2} = 0.551$$

$$R_o := \frac{V_o^2}{P_o} = 95.238 \Omega \quad \text{Resistor equivalente à carga}$$

Ondulações aceitas

$$\Delta I_{L1} := 10\% \quad \text{Ondulação no indutor de entrada}$$

$$\Delta I_{L2} := 20\% \quad \text{Ondulação no indutor intermediário}$$

$$\Delta V_{C1} := 2.0\% \quad \text{Ondulação no capacitor intermediário}$$

$$\Delta V_{C2} := 0.5\% \quad \text{Ondulação no capacitor de saída}$$

Dimensionamento do circuito

$$L_1 := \frac{V_{in}^2 \cdot D \cdot \lambda \cdot T_s}{\Delta I_{L1} \cdot P_o} = 0.574 \text{ mH} \quad \text{Indutor de entrada}$$

$$L_2 := \frac{V_{in}}{(1 - D \cdot \lambda)} \cdot \frac{\lambda \cdot D \cdot T_s \cdot V_o \cdot (1 - D)}{\Delta I_{L2} \cdot P_o} = 0.995 \text{ mH} \quad \text{Indutor intermediário}$$

$$C_1 := \frac{P_o \cdot D \cdot \lambda \cdot T_s \cdot (1 - D + D \cdot \lambda)}{V_o^2 \cdot (1 - D)^2 \cdot \Delta V_{C1}} = 23.339 \mu\text{F} \quad \text{Capacitor intermediário}$$

$$C_2 := \frac{(1 - D) \cdot T_s \cdot P_o}{V_{C2}^2 \cdot \Delta V_{C2}} = 18.87 \mu\text{F} \quad \text{Capacitor de saída}$$

Tensão média nos capacitores

$$V_{C1} := V_{in} \cdot \frac{1}{1 - D \cdot \lambda} = 96.501\text{V}$$

$$V_{C2} = 200\text{V}$$

Correntes médias e eficazes, máximas e mínimas nos indutores

Indutor de entrada

$$I_{L1\text{Med}} := \frac{P_o}{V_{in}} = 8.4\text{A} \quad \text{Corrente média no indutor 1}$$

$$I_{L1\text{Min}} := \left(1 - \frac{\Delta I_{L1}}{2}\right) \cdot I_{L1\text{Med}} = 7.98\text{A} \quad \text{Corrente mínima no indutor 1}$$

$$I_{L1\text{Max}} := \left(1 + \frac{\Delta I_{L1}}{2}\right) \cdot I_{L1\text{Med}} = 8.82\text{A} \quad \text{Corrente máxima no indutor 1}$$

$$I_{L1\text{Ef}} := I_{L1\text{Med}}$$

Indutor de saída

$$I_{L2\text{Med}} := \frac{P_o}{V_o \cdot (1 - D)} = 4.674\text{A}$$

$$I_{L2\text{Max}} := I_{L2\text{Med}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta I_{L2}}{2}\right) = 5.141\text{A}$$

$$I_{L2\text{Min}} := I_{L2\text{Med}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta I_{L2}}{2}\right) = 4.207\text{A}$$

Diodo 1

$$I_{D1MT1} := \left[I_{L2Max} + \left[I_{L1Max} + \left(\frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \right) \cdot (1 - \lambda) \cdot D \cdot T_s \cdot \frac{1}{2} \right] \right] \cdot D \cdot \frac{(1 - \lambda)}{2} = 0.479A$$

$$I_{D1MT2} := I_{L1Med} \cdot D \cdot \lambda = 4.048A$$

$$I_{D1Med} := I_{D1MT1} + I_{D1MT2} + I_{D1MT3} = 4.948A$$

$$I_{D1MT3} := \left[I_{L2Min} + \left[I_{L1Min} + \left(\frac{V_{C1} - V_{in}}{L_1} \right) \cdot (1 - \lambda) \cdot D \cdot T_s \cdot \frac{1}{2} \right] \right] \cdot D \cdot \frac{(1 - \lambda)}{2} = 0.421A$$

Diodo 2

$$I_{D2Med} := \frac{P_o}{V_o} = 2.1A$$

$$I_{D2Ef} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{(1-D) \cdot T_s} \left[I_{L2Max} + \frac{(V_{C1} - V_{C2})}{L_2} \cdot t \right]^2 dt} = 3.138A$$

Semiconductor S1

$$I_{S1Med} := \frac{1}{T_s} \cdot \left[\int_0^{\lambda \cdot D \cdot T_s} \left(I_{L1Min} + \frac{V_{in}}{L_1} \cdot t \right) dt + \int_0^{\lambda \cdot D \cdot T_s} I_{L2Min} + \frac{V_{C1}}{L_2} \cdot t dt \right] = 6.3A$$

$$I_{S1Ef} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{\lambda \cdot D \cdot T_s} \left[I_{L1Min} + I_{L2Min} + \left(\frac{V_{in}}{L_1} + \frac{V_{C1}}{L_2} \right) \cdot t \right]^2 dt} = 9.083A$$

Semicondutor S2

$$I_{S2Med} := \frac{1}{T_s} \cdot \left[\int_0^{\left(\frac{1-\lambda}{2}\right) \cdot D \cdot T_s} I_{L2Min} dt + \left(\int_0^{\lambda \cdot D \cdot T_s} I_{L2Min} + \frac{V_{C1}}{L_2} t dt \right) + \int_0^{\left(\frac{1-\lambda}{2}\right) \cdot D \cdot T_s} I_{L2Max} dt \right] = 2.574A$$

$$I_{S2Ef} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \left[\int_0^{\left(\frac{1-\lambda}{2}\right) \cdot D \cdot T_s} I_{L2Min}^2 dt + \int_0^{\lambda \cdot D \cdot T_s} \left(I_{L2Min} + \frac{V_{C1}}{L_2} t \right)^2 dt + \int_0^{\left(\frac{1-\lambda}{2}\right) \cdot D \cdot T_s} I_{L2Max}^2 dt \right]} = 3.476A$$

Dimensionamento do Indutor de Entrada L1

$$L_1 = 0.574 \text{ mH} \quad \text{Indutância}$$

$$B_{Max1} := 0.3T \quad \text{Indução magnética}$$

$$k_{w1} := 0.7 \quad \text{Fator de ocupação}$$

$$J_{Max1} := 450 \frac{A}{\text{cm}^2} \quad \text{Densidade de corrente nos condutores}$$

$$A_e A_{w1} := \frac{L_1 \cdot I_{L1Med} \cdot I_{L1Ef}}{B_{Max1} \cdot J_{Max1} \cdot k_{w1}} = 4.283 \text{ cm}^4$$

Núcleo Escolhido E-55/28/25 IP12 em paralelo

$$A_{e1} := 2 \cdot 4.213 \text{ cm}^2 = 8.426 \text{ cm}^2 \quad \text{Área Central}$$

$$A_{w1} := 3.7 \text{ cm}^2 \quad \text{Área da janela do carretel}$$

$$A_e A_{w1} := 31.176 \text{ cm}^4 \quad \text{Produto das áreas}$$

$$l_{e1} := 12.36\text{cm}$$

$$m_{n1} := 2 \cdot 0.13 \text{ kg} = 0.262 \text{ kg}$$

$$V_{e1} := 2.52070.9 \text{ mm}^3 = 104.142 \text{ cm}^3$$

$$l_{t1} := 17.5 \text{ cm}$$

Cálculo do número de espiras

$$N_1 := \text{ceil}\left(\frac{L_1 \cdot I_{L1\text{Max}}}{B_{\text{Max}1} \cdot A_{e1}}\right) = 21$$

$$B_{1\text{Real}} := \frac{L_1 \cdot I_{L1\text{Max}}}{A_{e1} \cdot N_1} = 0.286 \text{ T}$$

Cálculo do Entreferro

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$l_{\text{ent}1} := \frac{N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot A_{e1}}{L_1} = 0.814 \text{ mm}$$

Entreferro

Cálculo da Bitola do Condutor

$$\Delta_1 := \frac{7.5 \cdot s^{-0.5} \cdot \text{cm}}{\sqrt{2 \cdot f_s}} = 0.237 \text{ mm}$$

Profundidade de penetração
da corrente

$$d_{\text{fio}1} := 2 \cdot \Delta_1 = 0.047 \text{ cm}$$

Diâmetro máximo do fio

$$S_{\text{req}1} := \frac{I_{L1\text{Ef}}}{J_{\text{Max}1}} = 0.01867 \text{ cm}^2$$

Área requerida

Condutor Escolhido = AWG25

$$S_{\text{cond1}} := 0.001624 \text{ m}^2 \quad \text{Área do condutor escolhido}$$

$$S_{\text{ConIso1}} := 0.002078 \text{ m}^2 \quad \text{Área do condutor escolhido + isolamento}$$

$$\rho_{\text{cond1}} := 0.001419 \frac{\Omega}{\text{cm}} \quad \text{Resistividade do fio AWG25 @ 100°C}$$

$$N_{\text{fios1}} := \text{ceil} \left(\frac{S_{\text{req1}}}{S_{\text{cond1}}} \right) = 12 \quad \text{Quantidade de condutores em paralelo}$$

Cálculo de Perdas

$$l_{t1} = 0.175 \text{ m} \quad \text{Comprimento médio de uma espira}$$

$$l_{\text{fio1}} := l_{t1} \cdot N_1 \quad \text{Comprimento do enrolamento}$$

$$R_{e1} := \frac{l_{\text{fio1}} \cdot \rho_{\text{cond1}}}{N_{\text{fios1}}} = 0.043 \Omega \quad \text{Resistência do indutor}$$

$$P_{\text{CuL1}} := R_{e1} \cdot I_{L1\text{Ef}}^2 = 3.066 \text{ W} \quad \text{Perdas no cobre}$$

Perdas magnéticas

$$m_{h1} = 0.262 \text{ kg} \quad \text{Massa do núcleo}$$

$$\Delta B_1 := \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1} \cdot I_{L1\text{Med}}}{N_1 \cdot A_{e1}} = 0.027 \text{ T} \quad \text{Indução magnética}$$

$$P_{p1} := 2.5 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \quad \text{Perdas por massa do núcleo}$$

$$P_{\text{Nucleo1}} := P_{p1} \cdot m_{h1} = 0.655 \text{ W} \quad \text{Perdas no núcleo}$$

Resistência Térmica no núcleo

$$R_{th1} := 23 \cdot \left(AeAw_{n1} \cdot \frac{1}{cm^4} \right)^{-0.37} = 6.442 \quad \text{Resistência térmica}$$

Elevação da temperatura

$$\Delta T1 := (P_{CuL1} + P_{Nucleo1}) \cdot \frac{R_{th1}}{W} = 23.972 \quad ^\circ C$$

Possibilidade de Execução

$$A_{w_min1} := \frac{N_1 \cdot N_{fios1} \cdot S_{ConIso1}}{k_{w1}} = 0.748 \text{ cm}^2$$

$$k_{exe1} := \frac{A_{w_min1}}{A_{w1}} = 0.202$$

Dimensionamento do Indutor de Entrada L2

$$L_2 = 0.995 \text{ mH}$$

$$I_{L2Max} = 5.141 \text{ A}$$

$$I_{L2Med} = 4.674 \text{ A}$$

$$I_{L2Ef} := I_{L2Med} = 4.674 \text{ A}$$

$$B_{Max2} := 0.3 \text{ T}$$

$$k_{w2} := 0.7$$

$$J_{\text{Max}2} := 450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Determinação do núcleo

$$A_{\text{e}2} A_{\text{w}2} := \frac{L_2 \cdot I_{\text{L}2\text{Med}} \cdot I_{\text{L}2\text{Ef}}}{B_{\text{Max}2} \cdot J_{\text{Max}2} \cdot k_{\text{w}2}} = 2.3 \text{ cm}^4$$

Núcleo Escolhido E-55/28/25 IP12

| | |
|---|-----------------------------------|
| $A_{\text{e}2} := 4.213 \text{ cm}^2$ | Area Central |
| $A_{\text{w}2} := 3.7 \text{ cm}^2$ | Área da janela do carretel |
| $A_{\text{e}2} A_{\text{w}2} := 15.58 \text{ cm}^4$ | Produto das áreas |
| $l_{\text{e}2} := 12.36 \text{ cm}$ | Comprimento magnético equivalente |
| $l_{\text{t}2} := 12.5 \text{ cm}$ | Comprimento médio de uma espira |
| $V_{\text{e}2} := 52.07 \text{ cm}^3$ | Volume do ferrite |
| $m_{\text{n}2} := 0.131 \text{ kg}$ | Massa do núcleo |

Cálculo do número de espiras

$$N_2 := \text{ceil} \left(\frac{L_2 \cdot I_{\text{L}2\text{Max}}}{B_{\text{Max}2} \cdot A_{\text{e}2}} \right) = 41$$

$$B_{\text{real}2} := \frac{L_2 \cdot I_{\text{L}2\text{Max}}}{A_{\text{e}2} \cdot N_2} = 0.296 \text{ T}$$

Cálculo do Entreferro

$$l_{ent2} := \frac{N_2^2 \cdot \mu_o \cdot A_{e2}}{L_2} = 0.895 \text{ mrr}$$

Cálculo da Bitora do Condutor

$$\Delta_2 := \frac{7.5 \cdot s^{-0.5} \cdot \text{cm}}{\sqrt{2 \cdot f_s}} = 0.237 \text{ mrr}$$

$$d_{fio2} := 2 \cdot \Delta_2 = 0.047 \text{ cm}$$

$$S_{req2} := \frac{I_{L2} E_f}{J_{Max2}} = 1.03868 \text{ mm}^2$$

Condutor Escolhido = AWG25

$$S_{cond2} := 0.001624 \text{ cm}^2$$

$$S_{ConIso2} := 0.002078 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{cond2} := 0.001419 \frac{\Omega}{\text{cm}}$$

$$N_{fios2} := \text{ceil} \left(\frac{S_{req2}}{S_{cond2}} \right) = 7$$

Cálculo de Perdas

Perdas no cobre:

$$l_2 = 0.125 \text{ m}$$

$$l_{fio2} := l_2 \cdot N_2 = 5.125 \text{ m}$$

$$P_{\text{CuL2}} := R_{e2} \cdot I_{L2\text{Ef}}^2 = 2.27\text{W}$$

$$R_{e2} := \frac{l_{\text{fio2}} \cdot \rho_{\text{cond2}}}{N_{\text{fios2}}} = 0.104\Omega$$

Perdas Magnéticas

$$m_{\text{n2}} = 0.131\text{kg}$$

$$\Delta B_2 := \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L2} \cdot I_{L2\text{Med}}}{N_2 \cdot A_{e2}} = 0.054\text{T}$$

$$P_{\text{p2}} := 2.5 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

$$P_{\text{nucleo2}} := P_{\text{p2}} \cdot m_{\text{n2}} = 0.328\text{W}$$

Resistência térmica do núcleo

$$R_{\text{th2}} := 23 \cdot \left(A_e A_{w_{n2}} \cdot \frac{1}{\text{cm}^4} \right)^{-0.37} = 8.327$$

Elevação da Temperatura

$$\Delta T_2 := (P_{\text{CuL2}} + P_{\text{nucleo2}}) \cdot \frac{R_{\text{th2}}}{W} = 21.626$$

Possibilidade de execução

$$A_{w_{\text{min2}}} := \frac{N_2 \cdot N_{\text{fios2}} \cdot S_{\text{ConIso2}}}{k_{w2}} = 0.852\text{cm}^2$$

$$k_{\text{exe2}} := \frac{A_{w_{\text{min2}}}}{A_{w2}} = 0.23$$

Cálculo de perdas nos componentes

Cálculo de perda D1

IDW12G65C5

$$R_{\text{diff}}(T_j) := 1.07 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega \cdot T_j^2 + 1.07 \cdot 10^{-4} \cdot \Omega \cdot T_j + 0.039 \Omega$$

Resistência equivalente

$$V_{\text{th}}(T_j) := -0.001 \cdot T_j \cdot V + 1.04V \quad \text{Tensão de condução}$$

$$R_{\text{diffD1}} := R_{\text{diff}}(100) = 0.06 \Omega \quad \text{Temperatura de junção em operação}$$

$$V_{\text{thD1}} := V_{\text{th}}(T_j) = 0.94V \quad T_j := 100$$

$$P_{\text{D1}} := I_{\text{D1Med}} \cdot V_{\text{thD1}} + I_{\text{D1Ef}}^2 \cdot R_{\text{diffD1}} = 7.306W$$

Cálculo de perda D2

$$P_{\text{D2}} := I_{\text{D2Med}} \cdot V_{\text{thD1}} + I_{\text{D2Ef}}^2 \cdot R_{\text{diffD1}} = 2.569W$$

Cálculo de perda S1

Modelo IPA60R165CP @100°C

$$R_{\text{DSon}} := 90 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$P_{\text{S1}} := I_{\text{S1Ef}}^2 \cdot R_{\text{DSon}} = 7.424W$$

Cálculo de perda S2

$$P_{\text{S2}} := I_{\text{S2Ef}}^2 \cdot R_{\text{DSon}} = 1.087W$$

$$P_{\text{perdas}} := P_{\text{D1}} + P_{\text{D2}} + P_{\text{S1}} + P_{\text{S2}} + P_{\text{CuL1}} + R_{e1} \cdot I_{L1Ef}^2 + R_{e2} \cdot I_{L2Ef}^2 + P_{\text{CuL2}} = 29.059W$$

$$\eta := \frac{P_o}{P_o + P_{\text{perdas}}} = 0.935 \quad \text{Rendimento para 150\% da carga}$$

APÊNDICE B

>

Definição das matrizes referentes aos estados topológicos do conversor

S1 conduzindo

S2 conduzindo

Período: αDTs

$$A1 = \begin{bmatrix} -\frac{(Rs1 + Rl1)}{L1} & -\frac{Rs1}{L1} & 0 & 0 \\ -\frac{Rs1}{L2} & -\frac{(Rs1 + Rs2 + Rl2 + Rc1)}{L2} & \frac{1}{L2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C2 \cdot (Ro + Rc2)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{Rs1 + Rl1}{L1} & -\frac{Rs1}{L1} & 0 & 0 \\ -\frac{Rs1}{L2} & -\frac{Rs1 + Rs2 + Rl2 + Rc1}{L2} & \frac{1}{L2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C2(Ro + Rc2)} \end{bmatrix}$$

$$B1 := \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Cc1 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} -\frac{(Rd1 + Rl1 + Rc1)}{L1} & -\frac{Rd1}{L1} & -\frac{1}{L1} & 0 \\ -\frac{Rd1}{L2} & -\frac{(Rd1 - Rs2 - Rl2)}{L2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C2 \cdot (Ro + Rc2)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{Rd1 + Rl1 + Rc1}{L1} & -\frac{Rd1}{L1} & -\frac{1}{L1} & 0 \\ -\frac{Rd1}{L2} & -\frac{Rd1 - Rs2 - Rl2}{L2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C2(Ro + Rc2)} \end{bmatrix}$$

$$B2 := \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} - \frac{Vd1}{L1 \cdot Vpv} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L1} - \frac{Vd1}{L1 Vpv} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Cc2 := [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$[0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$A3 = \begin{bmatrix} -\frac{(Rd1 + Rl1 + Rc1)}{L1} & \frac{Rc1}{L1} & -\frac{1}{L1} & 0 \\ \frac{Rc1}{L2} & -\frac{(Rc1 + Rc2 + Rd2)}{L2} & \frac{1}{L2} & \frac{1}{L2} \cdot \left(\frac{Rc2}{Ro + Rc2} - 1\right) \\ \frac{1}{C1} & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Ro}{C2 \cdot (Ro + Rc2)} & 0 & -\frac{1}{C2 \cdot (Ro + Rc2)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{Rd1 + Rl1 + Rc1}{L1} & \frac{Rc1}{L1} & -\frac{1}{L1} & 0 \\ \frac{Rc1}{L2} & -\frac{Rc1 + Rc2 + Rd2}{L2} & \frac{1}{L2} & \frac{Rc2}{Ro + Rc2} - 1 \\ \frac{1}{C1} & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Ro}{C2(Ro + Rc2)} & 0 & -\frac{1}{C2(Ro + Rc2)} \end{bmatrix}$$

$$B3 := \begin{bmatrix} \frac{1}{L1} - \frac{Vd1}{L1 \cdot Vpv} \\ -\frac{Vd2}{L2 \cdot Vpv} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L1} - \frac{Vd1}{L1 Vpv} \\ -\frac{Vd2}{L2 Vpv} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Cc3 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Análise estática do conversor

$$\alpha := 0.875$$

$$0.875$$

$$Vpv := 50$$

$$50$$

$$A := \text{simplify}(A1 \cdot \alpha \cdot \Delta + A2 \cdot \Delta \cdot (1 - \alpha) + A3 \cdot (1 - \Delta)) :$$

$$B := \text{simplify}(B1 \cdot \alpha \cdot \Delta + B2 \cdot \Delta \cdot (1 - \alpha) + B3 \cdot (1 - \Delta)) :$$

$$C := \text{simplify}(Cc1 \cdot \alpha \cdot \Delta + Cc2 \cdot \Delta \cdot (1 - \alpha) + Cc3 \cdot (1 - \Delta)) :$$

$$X := \text{simplify}(-1 \cdot \text{inv}(A) \cdot B \cdot Vpv) :$$

>

$$Y := CX$$

$$\begin{aligned}
& - \left(0.50000000000 \text{Ro} (-1. + \Delta) (\text{Ro} + \text{Rc}2) \left(960. \Delta \text{Vd}1 + 25600. \right. \right. \\
& \quad - 512. \text{Vd}1 - 504. \Delta^2 \text{Vd}1 - 25600. \Delta + 49. \Delta^3 \text{Vd}1 + 2800. \Delta^2 \\
& \quad \left. \left. - 512. \text{Vd}2 + 1408. \text{Vd}2 \Delta - 1288. \text{Vd}2 \Delta^2 + 392. \text{Vd}2 \Delta^3 \right) \right) / \\
& \left(896. \text{Rc}2 \Delta \text{Rs}1 - 192. \text{Rc}2 \Delta \text{Rd}1 + 256. \text{Rc}2 \Delta \text{Rc}1 \right. \\
& \quad - 896. \Delta^2 \text{Rc}2 \text{Rs}1 - 60. \Delta^2 \text{Rc}2 \text{Rd}1 - 256. \Delta^2 \text{Rc}2 \text{Rc}1 \\
& \quad - 64. \Delta \text{Rc}2 \text{Rl}1 - 896. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rs}1 - 60. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rd}1 \\
& \quad - 256. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rc}1 - 64. \text{Ro} \Delta \text{Rl}1 + 896. \text{Ro} \Delta \text{Rs}1 \\
& \quad - 192. \text{Ro} \Delta \text{Rd}1 + 256. \text{Ro} \Delta \text{Rc}1 - 704. \text{Ro} \Delta \text{Rc}2 \\
& \quad - 704. \text{Ro} \Delta \text{Rd}2 + 192. \text{Rc}2 \Delta \text{Rs}2 + 192. \text{Rc}2 \Delta \text{Rl}2 \\
& \quad - 704. \text{Rc}2 \Delta \text{Rd}2 + 192. \text{Ro} \Delta \text{Rs}2 + 192. \text{Ro} \Delta \text{Rl}2 \\
& \quad + 644. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rd}2 - 336. \text{Rc}2 \Delta^2 \text{Rs}2 - 336. \text{Rc}2 \Delta^2 \text{Rl}2 \\
& \quad + 644. \text{Rc}2 \Delta^2 \text{Rd}2 - 336. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rs}2 - 336. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rl}2 \\
& \quad + 644. \text{Ro} \Delta^2 \text{Rc}2 + 224. \Delta^3 \text{Rc}2 \text{Rs}1 + 28. \Delta^3 \text{Rc}2 \text{Rd}1 \\
& \quad + 28. \Delta^3 \text{Rc}2 \text{Rc}1 + 4. \Delta^2 \text{Rc}2 \text{Rl}1 - 704. \Delta \text{Rc}2^2 - 960. \text{Ro}^2 \Delta \\
& \quad + 1348. \text{Ro}^2 \Delta^2 + 644. \Delta^2 \text{Rc}2^2 - 840. \text{Ro}^2 \Delta^3 + 4. \text{Rl}1 \text{Ro} \Delta^2 \\
& \quad + 147. \text{Ro} \text{Rs}2 \Delta^3 + 224. \text{Ro} \text{Rs}1 \Delta^3 + 147. \text{Rl}2 \text{Ro} \Delta^3 \\
& \quad - 196. \text{Rd}2 \text{Ro} \Delta^3 + 28. \text{Rd}1 \text{Ro} \Delta^3 + 147. \text{Rc}2 \text{Rs}2 \Delta^3 \\
& \quad - 196. \text{Rc}2 \text{Ro} \Delta^3 + 147. \text{Rc}2 \text{Rl}2 \Delta^3 - 196. \text{Rc}2 \text{Rd}2 \Delta^3 \\
& \quad + 28. \text{Rc}1 \text{Ro} \Delta^3 - 196. \text{Rc}2^2 \Delta^3 + 196. \text{Ro}^2 \Delta^4 + 256. \text{Rc}2^2 \\
& \quad + 256. \text{Ro}^2 + 256. \text{Ro} \text{Rc}2 + 256. \text{Ro} \text{Rd}2 + 256. \text{Rc}2 \text{Rd}2 \\
& \quad \left. + 256. \text{Rc}2 \text{Rd}1 + 256. \text{Rc}2 \text{Rl}1 + 256. \text{Ro} \text{Rd}1 + 256. \text{Ro} \text{Rl}1 \right)
\end{aligned}$$

$$\Delta := 0.588550$$

$$0.588550$$

$$G := \frac{Y}{V_{pv}}$$

$$\begin{aligned} & (0.004114500000 Ro (Ro + Rc2) (-111.5835600 Vd1 + 11503.01509 \\ & - 49.5568945 Vd2)) / (127.9232513 Rc2 Rd1 \\ & + 219.7183644 Rc2 Rl1 + 67.70099530 Rc2 Rc1 \\ & + 127.9232513 Ro Rd1 + 219.7183644 Ro Rl1 \\ & + 24.7784472 Ro Rc2 + 24.77844725 Ro Rd2 \\ & + 24.77844725 Rc2 Rd2 + 24.7784472 Rc2^2 + 10.19509210 Ro^2 \\ & + 262.6409125 Rc2 Rs1 + 262.6409125 Ro Rs1 \\ & + 67.70099526 Ro Rc1 + 26.5828567 Ro Rs2 \\ & + 26.58285666 Ro Rl2 + 26.5828567 Rc2 Rs2 \\ & + 26.58285666 Rc2 Rl2) \end{aligned}$$

Y

$$\begin{aligned} & (0.2057250000 Ro (Ro + Rc2) (-111.5835600 Vd1 + 11503.01509 \\ & - 49.5568945 Vd2)) / (127.9232513 Rc2 Rd1 \\ & + 219.7183644 Rc2 Rl1 + 67.70099530 Rc2 Rc1 \\ & + 127.9232513 Ro Rd1 + 219.7183644 Ro Rl1 \\ & + 24.7784472 Ro Rc2 + 24.77844725 Ro Rd2 \\ & + 24.77844725 Rc2 Rd2 + 24.7784472 Rc2^2 + 10.19509210 Ro^2 \\ & + 262.6409125 Rc2 Rs1 + 262.6409125 Ro Rs1 \\ & + 67.70099526 Ro Rc1 + 26.5828567 Ro Rs2 \\ & + 26.58285666 Ro Rl2 + 26.5828567 Rc2 Rs2 \\ & + 26.58285666 Rc2 Rl2) \end{aligned}$$

Análise dinâmica do conversor CC-CC Boost QTN

$$V_{pv} := 50$$

| | |
|------------------------------|------------------|
| | 50 |
| $L1 := 0.579 \cdot 10^{-3}$ | 0.0005790000000 |
| $Rl1 := 0.043$ | 0.043 |
| $L2 := 1.035 \cdot 10^{-3}$ | 0.0010350000000 |
| $Rl2 := 0.106$ | 0.106 |
| $C1 := 22.805 \cdot 10^{-6}$ | 0.00002280500000 |
| $Rc1 := 0.0053$ | 0.0053 |
| $C2 := 2 \cdot 10^{-3}$ | $\frac{1}{500}$ |
| $Rc2 := 0.0053$ | 0.0053 |
| $Vd1 := 0.94$ | 0.94 |
| $Rd1 := 0.06$ | 0.06 |
| $Vd2 := 0.94$ | 0.94 |
| $Rd2 := 0.06$ | 0.06 |
| $Rs1 := 0.09$ | 0.09 |
| $Rs2 := 0.09$ | 0.09 |

$Ro := 125$

125

$\Delta := 0.588550$

0.588550

G

4.415281273

Y

220.7640634

$mI := IdentityMatrix(4)$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$x := simplify(((s.mI - A)^{-1}).((A1.\alpha + A2.(1 - \alpha) - A3).X + (B1.\alpha + B2.(1 - \alpha) - B3).Vin)) :$

$gs := simplify(C.x)$

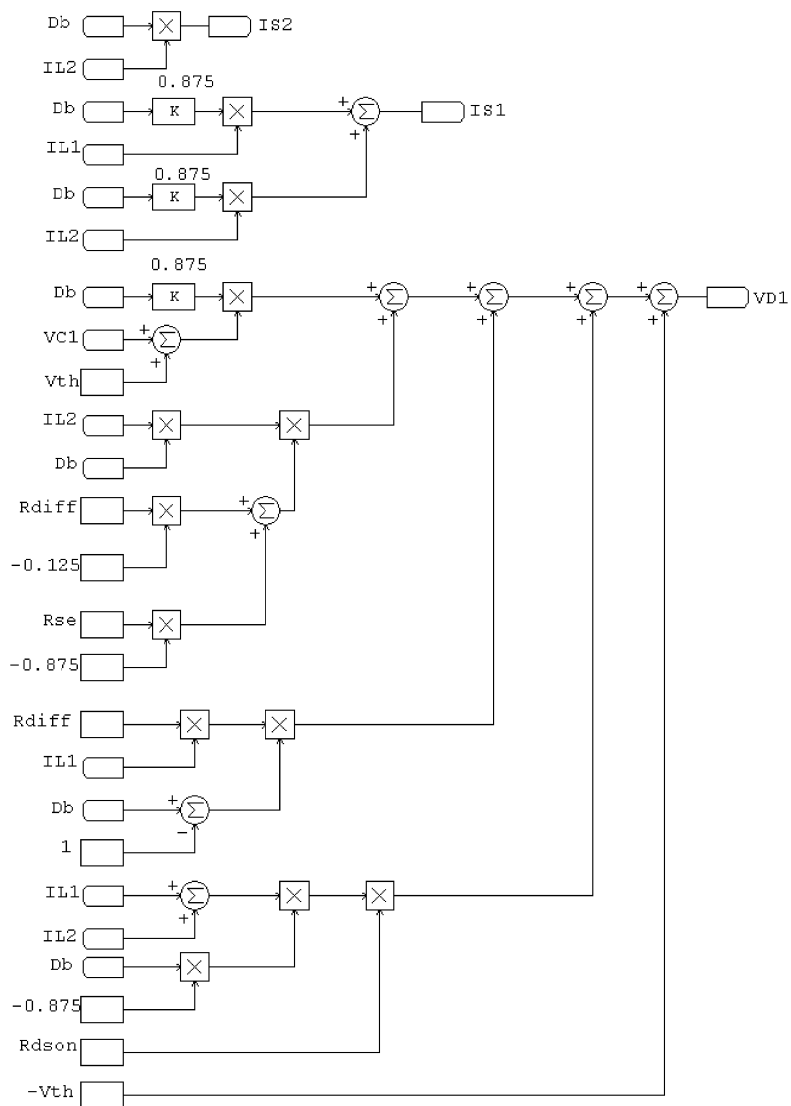
$$\begin{aligned}
& (8.00000000 \cdot 10^8 (4.579614656 \cdot 10^{27} s + 2.933108002 \cdot 10^{25} Vin \\
& + 2.103653960 \cdot 10^{29} + 3.601598710 \cdot 10^{25} s^2 \\
& + 1.214883053 \cdot 10^{23} s^3 + 1.444991634 \cdot 10^{20} s^4 \\
& + 6.423590622 \cdot 10^{23} s Vin + 5.105171928 \cdot 10^{21} s^2 Vin \\
& + 1.759805220 \cdot 10^{19} s^3 Vin + 2.238691778 \cdot 10^{16} s^4 Vin \\
& + 4.325137492 \cdot 10^{11} s^5 Vin + 4.67085268 \cdot 10^8 s^6 Vin \\
& - 1.642714603 \cdot 10^{16} s^5 + 4.826683656 \cdot 10^{12} s^6 \\
& - 2.68264313 \cdot 10^8 s^7)) / ((2.090156077 \cdot 10^9 \\
& + 1.0000000 \cdot 10^7 s) (2.513066152 \cdot 10^{24} s + 2.727447874 \cdot 10^{22} s^2 \\
& + 1.548304778 \cdot 10^{20} s^3 + 4.554984521 \cdot 10^{17} s^4 \\
& + 9.543180220 \cdot 10^{25} + 5.461891392 \cdot 10^{14} s^5 + 9.577269591 \cdot 10^9 s^6 \\
& + 1.0000000 \cdot 10^7 s^7))
\end{aligned}$$

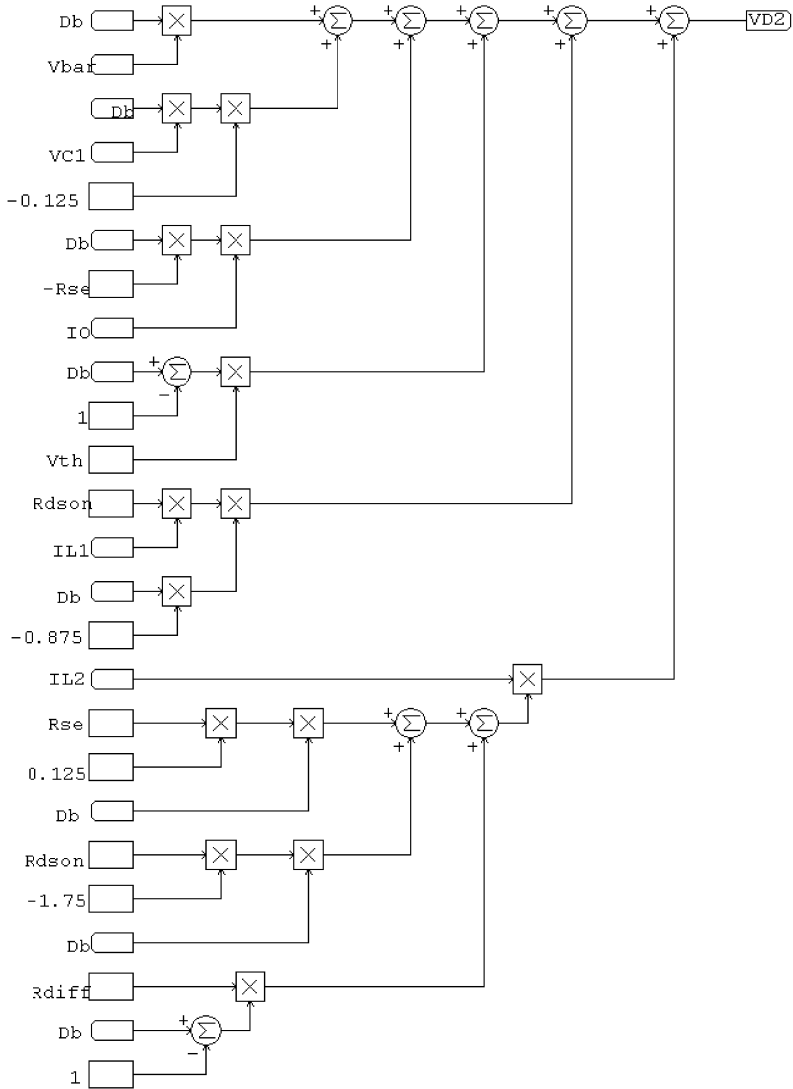
normalize expanded →

$$\begin{aligned}
& (5.268475142 \cdot 10^{28} s + 4.226920701 \cdot 10^{26} s^2 + 1.467541662 \cdot 10^{24} s^3 \\
& + 1.840185283 \cdot 10^{21} s^4 - 1.025223622 \cdot 10^{17} s^5 \\
& + 4.395421856 \cdot 10^{13} s^6 - 1.601810538 \cdot 10^9 s^7 \\
& + 2.389428720 \cdot 10^{30}) / (9.544299441 \cdot 10^{25} s \\
& + 1.102477616 \cdot 10^{24} s^2 + 7.120534899 \cdot 10^{21} s^3 \\
& + 2.778632001 \cdot 10^{19} s^4 + 3.488432616 \cdot 10^{27} \\
& + 6.230225633 \cdot 10^{16} s^5 + 6.180736880 \cdot 10^{13} s^6 \\
& + 1.137300987 \cdot 10^9 s^7 + 1.000000 \cdot 10^6 s^8)
\end{aligned}$$

APÊNDICE C

Circuito de simulação do modelo por valores médios de grandes sinais do conversor Boost QTN.





APÊNDICE D

Dimensionamento básico do inversor

| | |
|--|-------------------------|
| $V_o := 110V$ | Tensão na carga |
| $f_s := 50kHz$ | Frequência de comutação |
| $V_{bar} := 200V$ | Tensão de barramento |
| $f_L := 60Hz$ | Frequência da carga |
| $V_{oPk} := \sqrt{2} \cdot V_o = 155.563V$ | |

Características da carga

| | |
|---|----------------------------|
| $S_o := 1100W$ | Potência aparente da bomba |
| $\phi := 74.68deg$ | Angulo de fase da bomba |
| $FP := \cos(\phi) = 0.264$ | |
| $P_o := S_o \cdot \cos(\phi) = 290.631W$ | |
| $Q_o := S_o \cdot \sin(\phi) = 1.061 \times 10^3 W$ | |

Característica da carga

| | |
|---|----------------------|
| $R_L := \frac{V_o^2}{P_o} = 41.634\Omega$ | Resistência da carga |
| $X_L := \frac{V_o^2}{Q_o} = 11.405\Omega$ | Reatância indutiva |
| $L_L := \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f_L} = 30.253mH$ | Indutância da carga |

$$Z_{o1} := \frac{R_L \cdot i \cdot X_L}{R_L + i \cdot X_L} = (2.906 + 10.609j) \Omega$$

Impedância equivalente complexa da carga em paralelo

$$|Z_{o1}| = 11 \Omega$$

Módulo da impedância

$$\arg(Z_{o1}) = 74.68 \text{ deg}$$

Angulo de Fase

$$I_o := \frac{V_o}{|Z_{o1}|} = 10 \text{ A}$$

Corrente eficaz de carga

$$I_{oPk} := \sqrt{2} \cdot I_o = 14.142 \text{ A}$$

Corrente de pico da carga

Dimensionamento do Circuito

$$M := \frac{\sqrt{2} \cdot V_o}{V_{bar}} = 0.778$$

Índice de modulação

$$I_{in} := \frac{S_o}{V_{bar}} = 5.5 \text{ A}$$

Corrente de entrada no conversor

Determinação do filtro de saída LC

$$V_{o1ef} := \frac{M \cdot V_{bar}}{\sqrt{2}} = 110 \text{ V}$$

$$\zeta := 0.707 = 0.707$$

Fator de amortecimento

$$f_{cf} := 5 \text{ kHz}$$

Frequência de corte do filtro

$$C_f := \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \zeta \cdot f_{cf} \cdot R_o} = 2.046 \mu\text{F}$$

$$L_f := \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_{cf})^2 \cdot C_f} = 0.495 \text{ mH}$$

Verificação da frequência de corte

$$f_o := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}} = 5 \times 10^3 \cdot \text{Hz}$$

Verificação do fator de amortecimento

$$\zeta_f := \frac{1}{2 \cdot R_o} \cdot \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} = 0.707$$

Influência do Capacitor de filtragem C_f sobre a fundamental de corrente

$$Z_{Cf1} := \frac{1}{2i \cdot \pi \cdot f_L \cdot C_f} = -1.296i \times 10^3 \Omega$$

$$Z_{eq1} := \frac{Z_{o1} \cdot Z_{Cf1}}{Z_{o1} + Z_{Cf1}} = (2.954 + 10.69i) \Omega$$

$$K_1 := \left| \frac{Z_{Cf1}}{Z_{o1}} \right| = 117.833$$

$$Z_{o1} = (2.906 + 10.609i) \Omega$$

$$|Z_{o1}| = 11 \Omega$$

$$\frac{I_{in1}}{I_{o1}} := \left| \frac{\cos(\phi_1) + i \cdot (\sin(\phi_1) - K_1)}{K_1 \cdot (\sin(\phi_1) - i \cdot \cos(\phi_1))} \right| = 0.992$$

Influência do Indutor de filtragem sobre a fundamental da tensão na carga

$$Z_{Lf1} := i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot L_f = 0.187i \Omega$$

$$K_2 := \left| \frac{Z_{Lf1}}{Z_{o1}} \right| = 0.017$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{in1}} := \left| \frac{\left[\frac{K_1 \cdot (\sin(\phi_1) - i \cdot \cos(\phi_1))}{\cos(\phi_1) + i \cdot (\sin(\phi_1) - K_1)} \right]}{\left[\frac{K_1 \cdot (\sin(\phi_1) - i \cdot \cos(\phi_1))}{\cos(\phi_1) + i \cdot (\sin(\phi_1) - K_1)} + iK_2 \right]} \right| = 0.984$$

Dimensionamento do Indutor Lf

$$L_f = 0.495 \text{ mH}$$

Indutância desejada

$$I_{LfEf} := I_o = 10 \text{ A}$$

$$\Delta I_{Lf} := 5\%$$

Ondulação de corrente em alta frequência

$$f_L = 60 \text{ Hz}$$

Frequência da carga

$$f_{Lf} := 2 \cdot f_s = 100 \text{ kHz}$$

Frequência da tensão no indutor

$$I_{LfPk} := \sqrt{2} \cdot I_{LfEf} (1 + \Delta I_{Lf}) = 14.849 \text{ A}$$

Corrente de Pico no indutor

Projeto físico

$$B_{Max} := 0.4 \text{ T}$$

Indução máxima

$$J_{Max} := 400 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Máxima densidade de corrente

$$k_w := 0.7$$

Fator de ocupação

$$\mu_o := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$A_e A_w \Gamma := \frac{L_f \cdot I_{LfPk} \cdot I_{LfEf}}{B_{Max} \cdot J_{Max} \cdot k_w} = 6.564 \text{ cm}^4$$

Nucleo Escolhido E-55/28/25

$$A_e := 4.213 \text{ cm}^2$$

Área da Seção transversal do núcleo:

$$A_w := 3.7 \text{ cm}^2$$

Área da janela do carretel:

$$A_e A_w := 15.58 \text{ cm}^4$$

$$l_e := 123.60 \text{ mm}$$

$$l_t := 12.5 \text{ cm}$$

Cálculo do número de Espiras

$$N_{\text{max}} := \text{ceil} \left(\frac{L_f \cdot I_{LfPk}}{B_{\text{Max}} \cdot A_e} \right) = 44$$

Cálculo do entreferro

$$l_{\text{ent}} := \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e}{L_f} = 2.07 \text{ mm}$$

Cálculo da Bitola do Condutor

$$\Delta := \frac{7.5 \cdot s^{-0.5} \cdot \text{cm}}{\sqrt{2 \cdot f_s}} = 0.237 \text{ mm} \quad \text{Profundidade de penetração da corrente}$$

$$d_{\text{fio}} := 2 \cdot \Delta = 0.047 \text{ cm}$$

$$S_{\text{req}} := \frac{I_{LfEf}}{J_{\text{Max}}} = 2.5 \text{ mm}^2 \quad \text{Diâmetro máximo do condutor}$$

Condutor Escolhido = AWG26 Área do condutor

$$S_{\text{ConIso}} := 0.00167 \text{ cm}^2 \quad \text{Resistividade do condutor}$$

$$\rho_{\text{Cond}} := 0.001789 \frac{\Omega}{\text{cm}}$$

Quantidade de fios em paralelo

$$N_{\text{fios}} := \text{ceil} \left(\frac{S_{\text{req}}}{S_{\text{Cond}}} \right) = 20$$

Cálculo de Perdas

$$l_t = 0.125\text{m}$$

Comprimento médio da espira

$$l_{\text{fios}} := l_t \cdot N = 5.5\text{m}$$

Comprimento do enrolamento

Perdas Magnéticas

$$m_n = 0.131\text{kg}$$

Massa do núcleo

$$K_f := 4 \cdot 10^{-10} \text{s}^2$$

Perdas no cobre

$$K_h := 4 \cdot 10^{-5} \text{s}$$

Coeficientes por perdas parasitas

$$P_{\text{Cu}} := R_e \cdot I_L f E f^2 = 4.92\text{W}$$

$$\Delta B_{\text{fs}} := \frac{L_f \cdot \Delta I \cdot L_f \cdot I_L f P_k}{N \cdot A_w} = 0.023\text{T}$$

$$R_e := \frac{l_{\text{fios}} \cdot \rho_{\text{Cond}}}{N_{\text{fios}}} = 0.049\Omega$$

Coeficientes por perdas por histerese

$$P_{\text{NcBF}} := \left(2 \cdot \frac{B_{\text{Max}}}{T} \right)^{2.4} \cdot \left(K_h \cdot f_L + K_f \cdot f_L^2 \right) \cdot V_e \cdot \frac{W}{\text{cm}^3}$$

$$P_{\text{NcAF}} := \left(\frac{\Delta B_{\text{fs}}}{T} \right)^{2.4} \cdot \left(K_h \cdot f_s + K_f \cdot f_s^2 \right) \cdot V_e \cdot \frac{W}{\text{cm}^3} =$$

Perdas magnéticas de baixa frequência

$$P_{\text{Nc}} := P_{\text{NcBF}} + P_{\text{NcAF}} = 0.091\text{W}$$

Perdas totais no núcleo

$$R_{\text{nucleo}} := 23 \cdot \left(A_e \cdot \frac{A_w}{\text{cm}^4} \right)^{-0.37} = 8.325$$

K/°C

Elevação da Temperatura

$$\Delta T := (P_{Cu} + P_{Nc}) \cdot \frac{R_{nucleo}}{W} = 41.713 \quad \text{Elevação da temperatura}$$

Possibilidade de Execução

$$A_{w_min} := \frac{N \cdot N_{fios} \cdot S_{ConIso}}{0.7} = 2.101 \cdot \text{cm}^2 \quad k_{exe} := \frac{A_{w_min}}{A_w} = 0.568$$

Malha de Controle da tensão senoidal de saída

$$V_{triPk} := 1V$$

$$PWM := \frac{1}{V_{triPk}} = 1 \frac{1}{V}$$

Ganho do modulador PWM 3 níveis

$$j := \sqrt{-1}$$

Capacitor do filtro PB Sallen-Key de leitura de tensão

$$K_V := 1 = 1$$

Ganho do sensor de tensão da carga

$$C_{f1} := 10nF$$

$$C_{f2} := 1nF$$

Resistor do filtro PB Sallen-Key da leitura de tensão

$$R_{f1} := 22k\Omega$$

$$R_{f2} := 1.2k\Omega$$

$$f_c := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_{f1} \cdot R_{f2} \cdot C_{f1} \cdot C_{f2}}} = 9.795 \times 10^3 \cdot \text{Hz}$$

$$\zeta := 0.7139 = 0.714$$

$$f_{kv}(\omega) := \frac{(2 \cdot \pi \cdot f_c)^2}{(\omega \cdot j)^2 + (j \cdot \omega) \cdot 2 \cdot \zeta \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c + (2 \cdot \pi \cdot f_c)^2}$$

Planta do conversor

$$H_V(\omega) := \frac{R_0}{(j \cdot \omega)^2 \cdot L_f \cdot C_f \cdot R_0 + j \cdot \omega \cdot L_f + R_0} \cdot V_{\text{bar}}$$

$$f_{\text{cd}} := 1300\text{Hz}$$

$$\zeta_d := 0.707$$

$$f_{\text{kvd}}(\omega) := \frac{(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{cd}})^2}{(\omega \cdot j)^2 + (j \cdot \omega) \cdot 2 \cdot \zeta_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{cd}} + (2 \cdot \pi \cdot f_{\text{cd}})^2}$$

$$H_{V_mod_dB}(\omega) := 20 \cdot \log \left(\frac{|H_V(\omega)|}{V_{\text{bar}}} \right)$$

Ganho da planta

Fase da planta

$$\theta_{H_V}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(H_V(\omega))$$

$$FTLA_{V}(\omega) := H_V(\omega) \cdot \text{PWM} \cdot K_V \cdot f_{\text{kV}}(\omega) \cdot f_{\text{kvd}}(\omega)$$

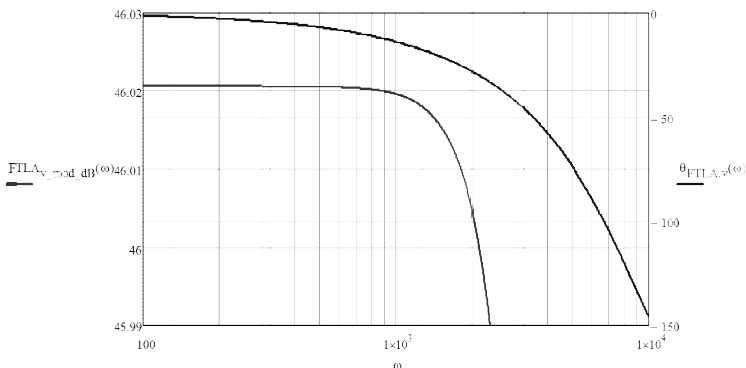
Função de transferência
de malha aberta

$$FTLA_{V_mod_dB}(\omega) := 20 \log(|FTLA_V(\omega)|)$$

Módulo da FTMA

$$\theta_{FTLA.V}(\omega) := \left(\frac{180}{\pi} \right) \arg(FTLA_V(\omega))$$

Fase da FTMA



$$\omega_{c_comp} := 2 \cdot \pi \cdot 500 \text{ Hz} = 3.142 \times 10^3 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{Frequência desejada do compensador}$$

$$M_{\phi_comp} := \frac{60 \cdot \pi}{180} = 1.047$$

$$\omega_Z := \frac{\omega_{c_comp}}{\tan(M_{\phi_comp})} = 1.814 \times 10^3 \cdot \text{Hz} \quad \text{Frequência}$$

Ganho

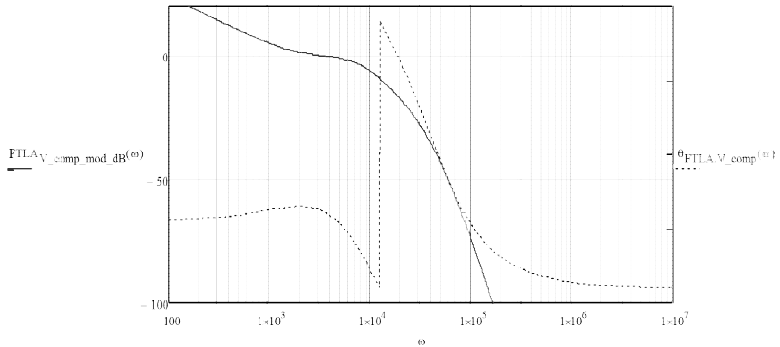
$$k_c := \frac{\omega_{c_comp}}{\left(\sqrt{\omega_{c_comp}^2 + \omega_Z^2} \right) \cdot \left| \text{FTLA}_V(\omega_{c_comp}) \right|} = 4.377 \times 10^{-3}$$

$$C_V(\omega) := k_c \cdot \frac{(j \cdot \omega + \omega_Z)}{j \cdot \omega}$$

$$\text{FTLA}_{V_comp}(\omega) := C_V(\omega) \cdot \text{FTLA}_V(\omega) \quad \text{Função de transf. de malha aberta}$$

$$\text{FTLA}_{V_comp_mod_dB}(\omega) := 20 \log\left(\left| \text{FTLA}_{V_comp}(\omega) \right|\right)$$

$$\theta_{\text{FTLA}_{V_comp}}(\omega) := \left(\frac{180}{\pi} \right) \arg(\text{FTLA}_{V_comp}(\omega))$$



$$\omega_{c_FTLAI_comp} := 3236 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$f_{c_FTLAI_comp} := \left(\frac{\omega_{c_FTLAI_comp}}{2 \cdot \pi} \right) = 515.025 \text{ Hz}$$

$$M_{\phi_FTLA_nc} := 180 - 85 = 95$$

$$k_c = 4.377 \times 10^{-3}$$

Ganho do compensador

$$T_s := \frac{1}{\omega_z} = 5.513 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Constante de tempo
do compensador

APÊNDICE E

> *with(LinearAlgebra) :*

with(MTM) :

> *with(DynamicSystems) :*

Definição das Matrizes Referentes à Primeira Etapa de Operação

$$a1 := 0$$

$$0$$

$$a2 := -\frac{1}{Lf}$$

$$-\frac{1}{Lf}$$

$$a3 := \frac{1}{Cf}$$

$$\frac{1}{Cf}$$

$$a4 := -\frac{1}{Ro \cdot Cf}$$

$$-\frac{1}{Ro \cdot Cf}$$

$$A1 := \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ a3 & a4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{Lf} \\ \frac{1}{Cf} & -\frac{1}{Ro \cdot Cf} \end{bmatrix}$$

$$b1 := \frac{1}{Lf}$$

$$\frac{1}{Lf}$$

$$b2 := 0$$

$$0$$

$$B1 := \begin{bmatrix} b1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Lf} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$> C1 := [0 \ 1]$$

$$[0 \ 1]$$

Definição das Matrizes Referentes à Segunda Etapa de Operação:

$$a5 := 0$$

$$0$$

$$a6 := -\frac{1}{Lf}$$

$$-\frac{1}{Lf}$$

$$a7 := \frac{1}{Cf}$$

$$\frac{1}{Cf}$$

$$a8 := -\frac{1}{Ro \cdot Cf}$$

$$-\frac{1}{Ro \cdot Cf}$$

$$A2 := \begin{bmatrix} a5 & a6 \\ a7 & a8 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{Lf} \\ \frac{1}{Cf} & -\frac{1}{Ro \cdot Cf} \end{bmatrix}$$

$$b3 := 0$$

$$0$$

$$b4 := 0$$

$$0$$

$$B2 := \begin{bmatrix} b3 \\ b4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C2 := [0 \ 1]$$

$$[0 \ 1]$$

Equilíbrio Estático:

Cálculo das matrizes médias quase-instantâneas:

$$A := \text{simplify}(A1 \cdot \Delta + A2 \cdot (1 - \Delta))$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{Lf} \\ \frac{1}{Cf} & -\frac{1}{Ro Cf} \end{bmatrix}$$

$$B := B1 \cdot \Delta + B2 \cdot (1 - \Delta)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta}{Lf} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Grandezas de interesse no ponto de operação:

$$\text{inv}A := A^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{Lf}{Ro} & Cf \\ -Lf & 0 \end{bmatrix}$$

$$X := -1 \cdot \text{inv}A \cdot B \cdot Vcc$$

$$-\begin{bmatrix} -\frac{\Delta}{Ro} \\ -\Delta \end{bmatrix} \cdot Vcc$$

$$C := C1 \cdot \Delta + C2 \cdot (1 - \Delta)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y := \text{simplify}(C \cdot X)$$

$$\Delta \cdot Vcc$$

Análise Dinâmica

$$mI := \text{IdentityMatrix}(2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x := \text{simplify}((s \cdot mI - A)^{-1} \cdot ((A1 - A2) \cdot X + (B1 - B2) \cdot Vin) \cdot \delta)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta (s Ro Cf + 1) Vin}{s^2 Lf Ro Cf + s Lf + Ro} \\ \frac{\delta Ro Vin}{s^2 Lf Ro Cf + s Lf + Ro} \end{bmatrix}$$

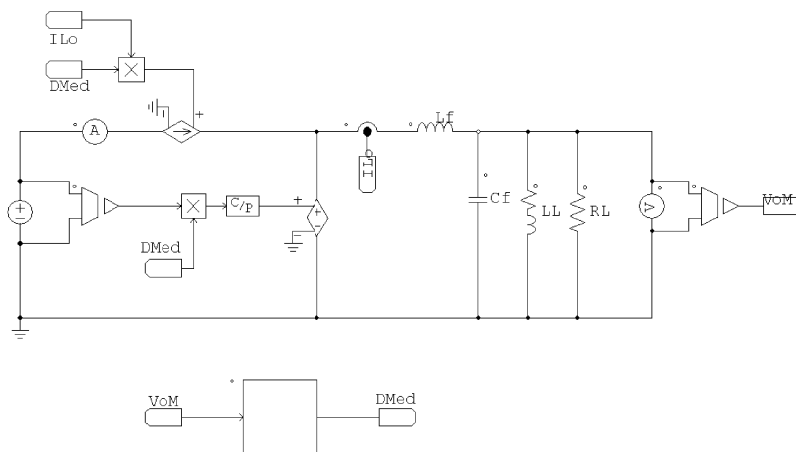
$v := \text{simplify}(Cx)$

$$\frac{\delta R_o V_{in}}{s^2 L_f R_o C_f + s L_f + R_o}$$

$$T_s := \frac{\text{simplify}(Cx + (C1 - C2)X)}{\delta} \frac{R_o V_{in}}{s^2 L_f R_o C_f + s L_f + R_o}$$

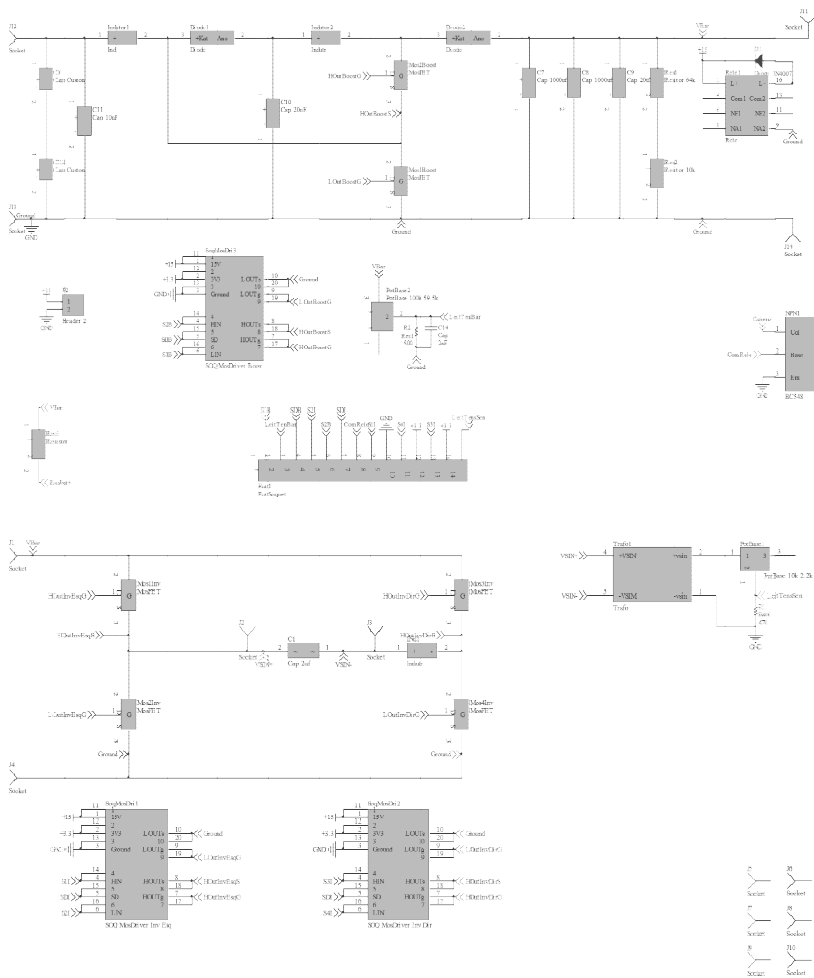
APÊNDICE F

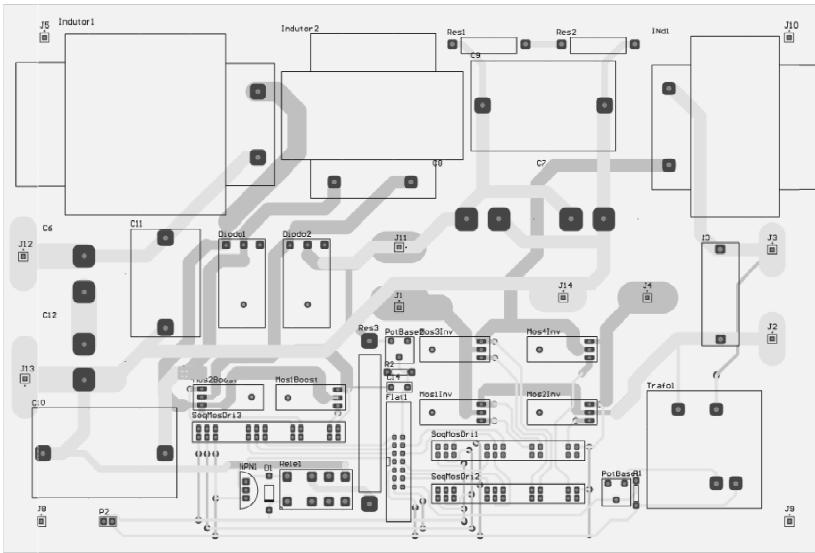
Circuito de simulação do modelo por valores médios de grandes sinais do conversor inversor em ponte completa.



APÊNDICE G

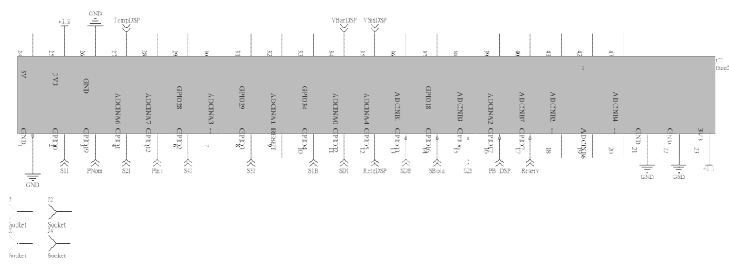
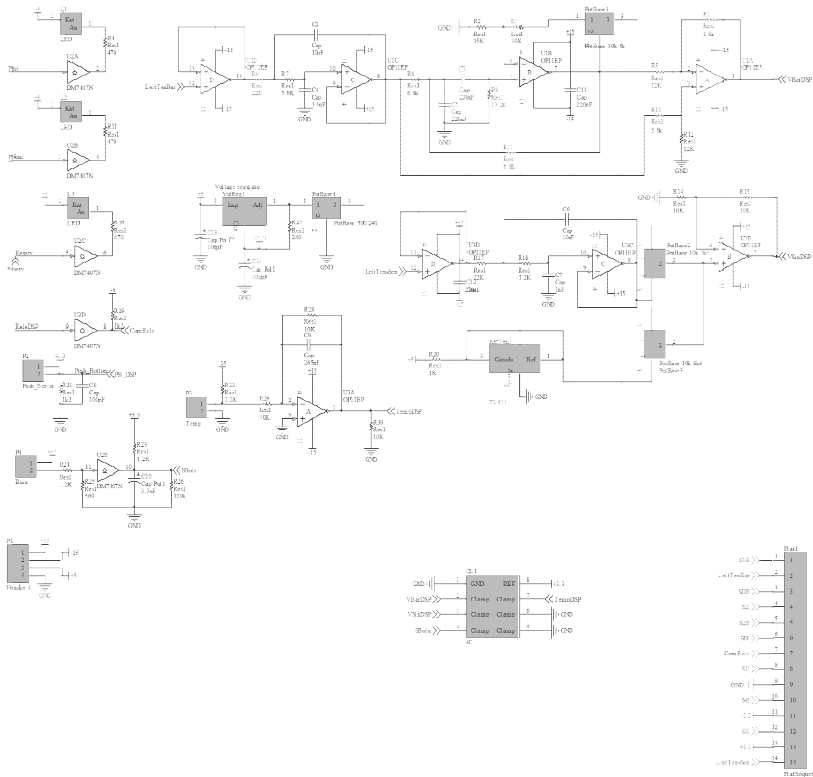
Esquemático e "layout" do conversor elevador.

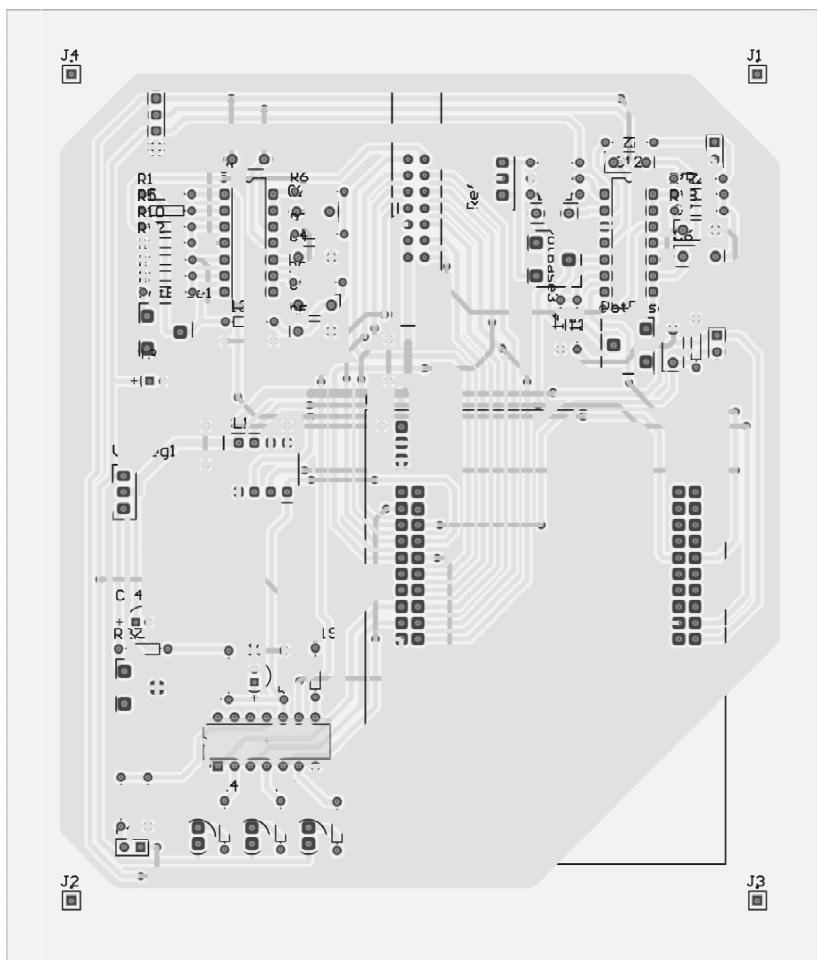




APÊNDICE H

Esquemático e "layout" do estágio inversor.





APÊNDICE I

/*****

INEP-UFSC

ARQUIVO:ISR.c

TÍTULO :Configurações gerais de interrupções

DATA: 30/03/2014

ATUALIZAÇÃO: xx/xx/xxxx

VERSÃO:1.0

DESENVOLVIMENTO: Rômulo Schweitzer

OBSERVAÇÕES:

```
//-----
// Arquivos Header
//-----
```

```
#include "DSP2802x_Device.h" // DSP2802x Header file Include File
#include "Define.h" // Definições gerais de operação
#include "qmath.h"
```

```
//Variáveis utilizadas para controlar frequencia de passagem em rotinas//
```

```
int ContBoost=0, ContSin = 0, ContGraf=0, FlatEntrContrInv=0;
long ContEntrOffset=0, LeitOffset=0, ContadorWT=0, AcumuladorWT=0, FlagAutSoma=0;
long OffSetAcumulador=0, DeltaOffset;
```

```
int Vseno, erron_1i=0, erroni=0, dinv, wt= -85;
```

```
signed long RefSen;
```

```
//////////Variáveis de controle do Boost QTN//////////
```

```
long vbarref = 3548; //tensao de ref = 220V Tensao nominal de barramento
```

```
signed long erron_1b=0, erronb, op1b, op2b, op3b, op4b, op4b_1, dboost, vbar, vbaracumu,
vbarmed, vbarrefcomp;
```

```
//////////Variáveis de controle do inversor (Malha PI)//////////
```

```
signed long opl1, op2i, op3i, op4i, op4iT, op4_1i;
```

```
//////////Variáveis do filtro digital (fc = 1.3kHz, e = 1)//////////
```

```
signed long op1f, op2f, op3f, op4f, op5f, op6f, op7f, Vnf, Vn_1f=0, Vn_2f=0, Ynf, Yn_1f=0,
Yn_2f=0, Offset=0;
```

```
//////////Variáveis do filtro de OffSET (fc = 5 Hz, e = 1)//////////
```

```
signed long op1OS, op2OS, op3OS, op4OS, op5OS, op6OS, op7OS, eOffset, eOffset_1=0,
eOffset_2=0, YOffset, YOffset_1=0, YOffset_2=0;
signed long YOffsetMax = 0;
```

```
//////////Gráficos para visualizacao de variaveis//////////
```

```
//extern signed int vetor1[771];
```

```
//extern signed int vetor2[300];
```

```

//extern signed int vetor3[300];

int habilita=0;
extern signed int flagtest;
//////////Funcao de controle de subida de rampa para Referencia senoidal//////////
void RampaPosSin (void);
int RampaSen=0, ContadorRampaPositiva=0;

//Funcao de controle de descida de rampa para Referencia senoidal//
void RampaNegSin (void);
int ContadorRampaNegativa=0;

//Funcao de controle do conversor Boost/////
void ControleTensaoBoost(void);

//Funcao de controle de subida de rampa p Referencia Barramento CC//
void RampaPosBoost (void);
extern int FlagAtivacaoBoost;
signed int RampaBoost=0, ContRampaBoostPos=0;

//Funcao de controle de descida de rampa p Referencia Barramento CC//
void RampaNegBoost (void);
int ContRampaBoostNeg=0;

//Funcao de controle da temperatura do painel//
void ControleTemperaturaPainel (void);

int      Temp = 25, i = 0;
long ContTemp = 2999900, DBoostMax=0, GBoostMax = 0, DBoostMaxQ21;

//////////Relacao ganho - razao ciclica//////////
int MatGanhoRazao[201][2] =
{{192,281},{194,283},{195,284},{196,285},{198,286},{199,288},{200,289},{201,290},{203,
291},{204,292},{205,293},{207,294},{208,295},{209,297},{210,298},
{212,299},{213,300},{214,301},{216,302},{217,303},{218,304},{219,305},{221,306},{222,
307},{223,308},{224,309},{226,310},{227,311},{228,312},{230,313},
{231,314},{232,315},{233,316},{235,316},{236,317},{237,318},{239,319},{240,320},{241,
321},{242,322},{244,323},{245,324},{246,324},{248,325},{249,326},
{250,327},{251,328},{253,329},{254,329},{255,330},{256,331},{258,332},{259,333},{260,
333},{262,334},{263,335},{264,336},{265,336},{267,337},{268,338},
{269,339},{271,339},{272,340},{273,341},{274,341},{276,342},{277,343},{278,344},{280,
344},{281,345},{282,346},{283,346},{285,347},{286,348},{287,348},
{288,349},{290,350},{291,350},{292,351},{294,352},{295,352},{296,353},{297,354},{299,
354},{300,355},{301,355},{303,356},{304,357},{305,357},{306,358},
{308,358},{309,359},{310,360},{312,360},{313,361},{314,361},{315,362},{317,363},{318,
363},{319,364},{320,364},{322,365},{323,365},{324,366},{326,366},
{327,367},{328,368},{329,368},{331,369},{332,369},{333,370},{335,370},{336,371},{337,
371},{338,372},{340,372},{341,373},{342,373},{344,374},{345,374},
{346,375},{347,375},{349,376},{350,376},{351,377},{352,377},{354,378},{355,378},{356,
379},{358,379},{359,380},{360,380},{361,381},{363,381},{364,382},
{365,382},{367,383},{368,383},{369,383},{370,384},{372,384},{373,385},{374,385},{376,
386},{377,386},{378,387},{379,387},{381,387},{382,388},{383,388},

```

```
{384,389},{386,389},{387,390},{388,390},{390,390},{391,391},{392,391},{393,392},{395,
392},{396,392},{397,393},{399,393},{400,394},{401,394},{402,394},
{404,395},{405,395},{406,396},{408,396},{409,396},{410,397},{411,397},{413,398},{414,
398},{415,398},{416,399},{418,399},{419,399},{420,400},{422,400},
{423,400},{424,401},{425,401},{427,402},{428,402},{429,402},{431,403},{432,403},{433,
403},{434,404},{436,404},{437,404},{438,405},{440,405},{441,405},
{442,406},{443,406},{445,406},{446,407},{447,407},{448,408}};
```

```
//////////Flags de sinalizacao do conversor//////////
int FlagAtivacaoInversor=0, FlagDesativacaoInversor=0, FlagDesativacaoBoost=0;
int FlagOperacaoInversor=0, FlagOperacaoBoost=0;
```

```
//////////variaveis em teste
```

```
long OffsetDireto=0;
int flagtestefixo = 0;
```

```
void interrupt ISR()
{
```

```
//-----
// Flags de Interrupção
//-----
```

```
    PieCtrlRegs.PIEACK.all= 0x0004;
    EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT=1;
```

```
//-----
// Conversor A/D
//-----
```

```
//-----area de controle do boost-----
```

```
    ContBoost++;

    if(ContBoost==41 || ContBoost==44 || ContBoost==47 ||
ContBoost==50) ControleTensaoBoost();

    ContTemp++;

    if(ContTemp>=3000000) ControleTemperaturaPainel();
```

```
//-----area de controle da tensao senoidal-----
```

```
    AdcRegs.ADCSOCFRC1.bit.SOC4=1; // Inicia conversão Canal A4
```

```
    while(AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT5==0){} // espera o fim da conversão
```

```
    AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT5=1; // limpa o flag da int
```

```
    Vnf = AdcResult.ADCRESULT4; // Leitura da tensao do barramento de saida
```

```
    op1f = (long) 99 * Vnf; //0.0060474375*2^14*Vnf
    op2f = (long) 198 * Vn_1f; // 0.012094875*2^14*Vn_1f
    op3f = (long) 99 * Vn_2f; //0.0060474375*2^14*Vn_2f
```

```

op4f = (long) 3622 * Yn_1f;    //-1.7683141*2^11*Yn_1f
op5f = (long) - 1623 * Yn_2f; //0.79250387*2^11*Yn_2f
op6f = (long) op1f + op2f;    //resultado em q10
op6f = (long) op6f + op3f;
op6f = (long) op6f >> 14;     //trans op6f de q10 p q8
op7f = (long) op4f + op5f;    //resultado em q8
op7f = (long) op7f >> 11;
Ynf = (long) op6f + op7f;

```

```

Vn_2f = (long) Vn_1f;
Vn_1f = (long) Vnf;
Yn_2f = (long) Yn_1f;
Yn_1f = (long) Ynf;
if(Yn_1f >= 4094) Yn_1f = 4094;
if(Yn_1f <= 0) Yn_1f = 0;

```

```

if(LeitOffset >= 50074)
{

```

```

////ROTINAS PARA DECISAO DE ATIV OU DES DO INVERSOR///
if(vbarmed >= ((15 * vbarref) >> 4) && vbarmed <= ((18 * vbarref) >> 4) &&
RampaSen == 0 && FlagOperacaoBoost == 1) FlagAtivacaoInversor = 1;

```

```

//rotina de inicializacao do inversor, caso barramento estabilizado, boost em operacao e rampa
senoidal = 0

```

```

if(FlagAtivacaoInversor == 1) RampaPosSin(); //entrada na rotina de inicializacao do
inversor

```

```

if(FlagDesativacaoInversor == 1) RampaNegSin(); //saida da rotina de
inicializacao do inversor

```

```

//ROTINA PARA INCREMENTO DA REFERENCIA SENOIDAL//
wt = wt + 80; //valor para conseguir 60 Hz

```

```

//ROTINA PARA REFERENCIA SENOIDAL E AMPLITUDE//
RefSen = (long) qsin(wt);
RefSen = (long) RefSen >> 4; //reduzindo a amp da ref para q12
RefSen = (46 * RefSen) >> 6;

```

```

RefSen = RampaSen * RefSen >> 4;

```

```

//MALHA DE CONTROLE PI DO INVERSOR///
Vseno = Ynf - 2000;

```

```

erron_li = erroni; //atribui valor ao erro do passo anterior
erroni = RefSen - Vseno; //calculo do erro da tensao em q1
op1i = (long) erroni << 12; //0.0044582866 * 401.78 * 300
op2i = (long) 3951 * erron_li; // -0.004296709 * 401.78 * 300 * 2
op3i = op1i - op2i;
op3i = 1074 * op3i;

```



```

op3i = op3i >> 12;
op4i = (long) op3i + op4i;
if(op4i>=1146880) op4i=1146880;
if(op4i<=-1146880) op4i=-1146880;
dinv = (int)(op4i>>12);
dinv = -1 * dinv;

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA=(unsigned int)(304+dinv);
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA=(unsigned int)(304+dinv);
}

//-----controle de offset-----
if(LeitOffset<=50073) //limita a quantidade de passagens pela rotina
{
if(LeitOffset>=50010)
{
//na equacao do filtro digital
Offset = Offset + Ynf; //acrescenta ao acumulador
CLEAR_RES;AdcRegs.ADCSOCFRC1.bit.SOC6=1; // Inicia conversão Canal A7
- Tensão de Offset
while(AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT7==0){}
AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT7=1; // limpa o flag da int
eOffSet = AdcResult.ADCRESULT6;// Leitura do A7
eOffSetAcumulador = eOffSetAcumulador + eOffSet;
}

if(LeitOffset==50073)
{Offset = Offset >> 6; //divisoes da quantidade de passagem
eOffSetAcumulador = eOffSetAcumulador >> 6;
DeltaOffset = Offset - eOffSetAcumulador;
}
LeitOffset++; //acrescenta o acumulador
}
}

void RampaPosSin (void)
{
ContadorRampaPositiva++; //incrementa contador
if(ContadorRampaPositiva>=10000) //caso tenha passado 15k vezes, ou seja, 0.33s
segundo
{
RampaSen = RampaSen + 1;//acrescenta valor na referencia da senoide
ContadorRampaPositiva = 0;
}

if(RampaSen==6)
{
CLEAR_RELE;
}
if(RampaSen>=16)
{
RampaSen = 16; //controle de rampa nao ultrapassa 1
}
}

```

```

        FlagOperacaoInversor=1;//sinaliza inversor operando
        FlagAtivacaoInversor=0;
//impede entradas indesejadas no algoritmo de ativacao do inversor
    }
}

void RampaNegSin (void)
{
    ContadorRampaNegativa++;
//incrementa contador
    if(ContadorRampaNegativa>=4500)        //caso tenha passado 10k vezes, ou seja,
    {
        RampaSen = RampaSen - 1;//decrementa valor na referencia
        ContadorRampaNegativa = 0;
    }

    if(RampaSen == 4)
    {
        SET_RELE;        //aciona rele barramento CC
    }
    if(RampaSen<= -1)
    {

        RampaSen = 0;
        FlagDesativacaoInversor = 0;//impede que entre na rotina
        FlagOperacaoInversor = 0;//sinaliza desligamento inversor
    }
}

void ControleTensaoBoost (void)
{
    if(ContBoost==41 || ContBoost==44 || ContBoost==47)
    {
        AdcRegs.ADCSOCFRC1.bit.SOC0=1;        // Inicia conversão Canal A0
        while(AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1==0){} // espera fim da conversão
        AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1=1; // limpa o flag da int
        vbar = AdcResult.ADCRESULT0;// Leitura da tensao do barramento de saida
        vbaracumu = vbaracumu + vbar;
    }

    if(ContBoost>=50)        //rotina para entrar no compensador em 1kHz
    {
        AdcRegs.ADCSOCFRC1.bit.SOC0=1;        // Inicia conversão Canal A0
        while(AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1==0){} // espera o fim
        AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1=1; // limpa o flag da int
        vbar = AdcResult.ADCRESULT0; // Leitura da tensao do barramento
        vbaracumu = vbaracumu + vbar;
        vbarmed = vbaracumu>>2;
        vbaracumu = 0;
    }
}

```

```

        if(vbarmed<=(14 * (vbarref>>4)) && FlagOperacaoBoost==1)
FlagDesativacaoBoost = 1; //no caso de subtensao no barramento, razao ciclica boost no
maximo, inversor desativado e flag operacao boost ativo

        if(FlagAtivacaoBoost==1) RampaPosBoost(); //entra na rotina de inicializacao do
boost, caso PB tenha sido acionado

        if(FlagDesativacaoBoost==1) RampaNegBoost();

        vbarrefcomp = (RampaBoost * (vbarref>> 5));
        erron_1b = erronb;
        erronb= (long) (vbarrefcomp - vbarmed); //calculo do erro da tensao em q12
        op1b = (long) 108154 * erronb;
        op2b = (long) 104300 * erron_1b;//0.0011317345 * 300 * 600
        op3b = (long) op1b - op2b;
        op4b_1 = op4b; //resultado de yn_1 eh atualizado
        op4b = (long) op3b + op4b_1; //operacoes sao somadas com

        if(op4b>=DBoostMaxQ21) op4b = DBoostMaxQ21; //Limitador da razao ciclica
maxima em 0.7
        if(op4b<=2097152) op4b = 2097152;//Limitador da razao ciclica minima em 0.016

        dboost = op4b>>21; //razao ciclica enviada para pwm
        EPwm4Regs.CMPA.half.CMPA=(unsigned int)(dboost);
        dboost = (7 * dboost)>> 3;
        EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA=(unsigned int)(dboost);

        ContBoost=0;

    }
}

void RampaPosBoost ()
{
    ContRampaBoostPos++; //incrementa contador
    if(ContRampaBoostPos>=350) //caso tenha passado 250 vezes
    {
        RampaBoost = RampaBoost + 1;//acrescenta valor na referencia
        ContRampaBoostPos = 0;
    }

    if(RampaBoost>=32)
    {
        RampaBoost = 32; //limita teto em 1
        FlagOperacaoBoost = 1; //sinaliza que boost ativo
        FlagAtivacaoBoost = 0; //impede entrar na rotina
ativacao boost
    }
}

void RampaNegBoost ()
{

```

```

if(ContRampaBoostNeg == 10) FlagOperacaoBoost = 0; //delay apenas para teste
FlagDesativacaoInversor = 1; //Sinaliza desativacao do inversor

```

```

ContRampaBoostNeg++; //incrementa contador
if(ContRampaBoostNeg >= 45) //caso tenha passado 250 vezes, {
RampaBoost = RampaBoost - 1; //acrescenta valor na referencia da senoide
ContRampaBoostNeg = 0;
}

```

```

if(RampaBoost <= -1)
{
RampaBoost = 0; //limita mínimo em 0
FlagDesativacaoBoost = 0;
SET_SD_BOOST; //desativa driver do boost
SET_SD_INV; //desliga mosfet driver
}
}

```

```

void ControleTemperaturaPainel ()

```

```

{
GBoostMax = (long) (vbarref << 12) / (61030 - ((Temp - 25) * 287));
//ganho maximo admitido em q6

```

```

GBoostMax = 400; //RETIRAR ISSO PARA EXPERIMENTO

```

```

while(MatGanhoRazao[i][0] <= GBoostMax) i++; //procura na matriz um
ganho imediatamente maior que o maximo possivel

```

```

DBoostMax = (long) MatGanhoRazao[i-1][1]; //entao, o ganho maximo
possivel é o anterior. retira o valor da 2 coluna, onde esta diretamente a razao ciclica do
conversor

```

```

DBoostMax = DBoostMax + 40;
DBoostMaxQ21 = (long) DBoostMax << 21;
i = 0;
ContTemp = 0;
}

```


APÊNDICE J

Lista dos componentes utilizados

| Placa de condicionamento e controle | |
|--|------------|
| Componente | Quantidade |
| Conector Flat 7 pinos macho | 2 |
| Conector Flat 7 pinos fêmea | 2 |
| Regulador de tensão TL431 | 1 |
| AMP OP 741 | 2 |
| Grampeador de tensão TL7726 | 1 |
| Buffer 7407 | 1 |
| Potenciômetro | 4 |
| LED | 3 |
| Capacitor cerâmico 3,3nF | 2 |
| Capacitor cerâmico 220nF | 5 |
| Capacitor cerâmico 10nF | 2 |
| Capacitor cerâmico 1nF | 1 |
| Capacitor cerâmico 100pF | 1 |
| Resistor 470 Ω | 3 |
| Resistor 1,2 k Ω | 3 |
| Resistor 560 Ω | 1 |
| Resistor 110 k Ω | 1 |
| Resistor 10 k Ω | 3 |
| Kit Controle Digital C2000 Piccolo LaunchPad | 1 |

| Placa de potência | |
|-------------------------------------|------------|
| Componente | Quantidade |
| Capacitor Eletrolítico 2200 μ F | 2 |
| Capacitor cerâmico 10 μ F | 1 |
| Capacitor cerâmico 20 μ F | 2 |
| Capacitor eletrolítico 1000 μ F | 2 |
| Indutor 0,587 mH | 1 |
| Indutor 1035 mH | 1 |
| Diodo IDW12G65C5 | 2 |
| Mosfet IPP600N25N3 | 2 |
| Resistor de potência 64 k Ω | 1 |
| Resistor de potência 10 k Ω | 1 |
| Diodo 1n4007 | 1 |

| | |
|------------------------------------|---|
| Capacitor cerâmico 2 nF | 1 |
| Resistor 500 Ω | 1 |
| MOSFET IRFB4229 | 4 |
| Capacitor cerâmico 2 μ F | 1 |
| Indutor 0,495 mH | 1 |
| Sensor de tensão LV25-P | 1 |
| Resistor de potência 68 k Ω | 1 |
| Resistor 220 Ω | 1 |
| Resistor 33 Ω | 1 |

| Placa de driver do MOSFET | |
|-------------------------------|------------|
| Componente | Quantidade |
| Diodo MUR210 | 6 |
| Capacitor cerâmico 1 μ F | 6 |
| Resistor 120 Ω | 6 |
| Capacitor eletrolítico 56 nF | 6 |
| Capacitor cerâmico 22 μ F | 6 |

| Bomba vibratória | |
|--------------------------|---|
| Rayma Sapeco 110 V 270 W | 1 |